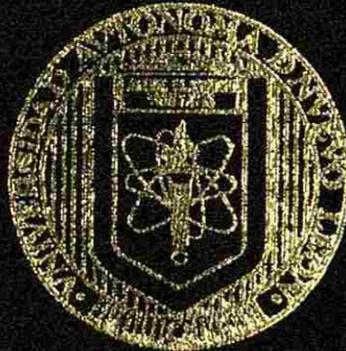


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE
Y EN FRIO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

CARACTÉRIZACION MICROORGANISMOS Y
SUSPENDIENDO LA INFECCION EN CAMELÉNTRE
Y EN FIBRO

TM
Z5853
.M2
FIME
2003
.G3

N. F. C. M. O.



1020149036



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

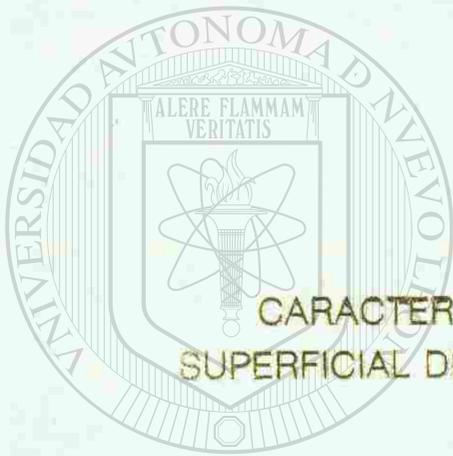
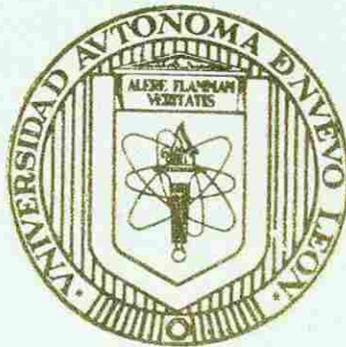
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE
Y EN FRIO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

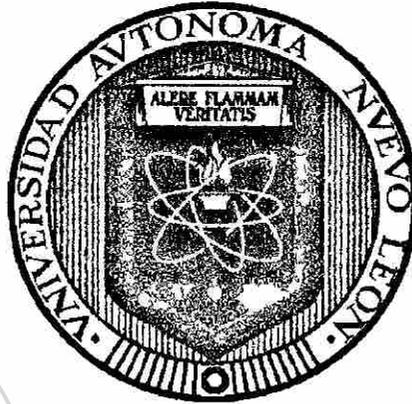
PRESENTA:

NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y
EN FRIO**

T E S I S

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

**PRESENTA
NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA**

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

8-22

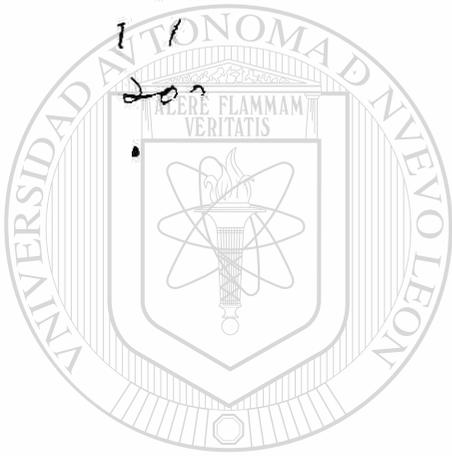
TH

Z5853

.M2

11

202



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

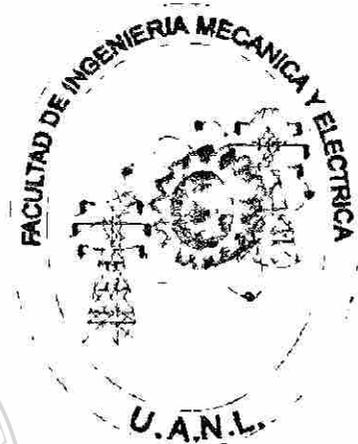


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CARACTERIZACION MICROESTRUCTURAL Y
SUPERFICIAL DE ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y
EN FRIO**

TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES**

**PRESENTA
NELSON FEDERICO GARZA MONTES DE OCA**

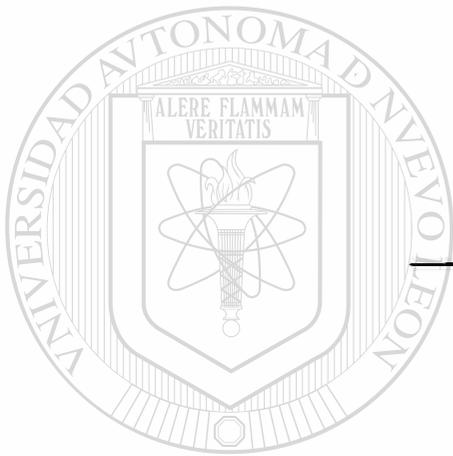
CD. UNIVERSITARIA

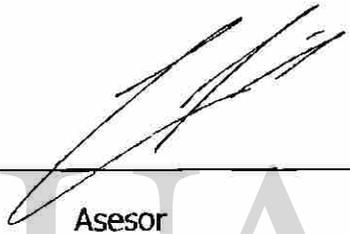
JULIO DEL 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Caracterización microestructural y superficial de aceros laminados en caliente y en frío", realizada por el alumno Nelson Federico Garza Montes de Oca, matrícula 890346, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



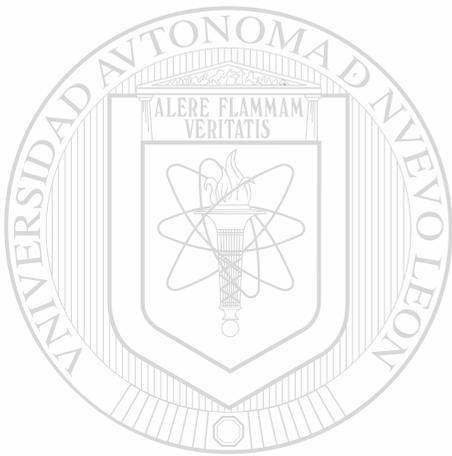

Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz


Coasesor
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata


Coasesor
Dr. Carlos Lizcano Zulaica


Vo.Bo
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Junio 2003



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cuando vuelvas para decirme adiós, yo te regalaré un secreto.....mi secreto es muy simple:

“Solo se ve con el corazón, lo esencial es invisible para los ojos”

***El Principito
Antoine de Saint-Exupéry***

DEDICATORIA



**A DIOS POR DARME LA VIDA Y TODO LO QUE EN ELLA JUNTOS HEMOS
ESCRITO.**

UANL

A MIS PADRES FEDERICO Y MARICELA, POR TODO SU AMOR .

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
A MIS HERMANOS LISSETTE, MARICELA, GERARDO, ZEFERINO.**

A MI NOVIA GISELA.

AGRADECIMIENTOS.

Antes que todo, quiero agradecer a Dios por permitirme culminar un etapa mas en mi carrera, por que sin su ayuda hubiera sido mas dificil, en verdad amigo, me llevas en tus brazos.

A mi familia, sobre todo a mis padres Federico y Maricela, quienes me han apoyado siempre y siempre (además de aguantar todos los dolores de cabeza que les doy), así como a mis hermanos Liz, Chela, Gera, Zefe, este triunfo es nuestro.

Muy especialmente quiero agradecer a la persona que SIEMPRE y desde que la conocí, ha estado conmigo en todo momento apoyándome y es imposible que falte en este, me refiero a mi novia Gis, gracias por ayudarme a estar tranquilo cuando más lo necesitaba, pero sobre todo muchas gracias por tu interminable amor, PACIENCIA y comprensión, además por todo lo que hemos aprendido juntos, pero en verdad infinitas gracias te doy por haberle regresado la luz y la magia a mi vida, Te amo Gis.

A la familia Azpilcueta Salinas por su apoyo y confianza, pero más que nada por haberme abierto las puertas de su hogar.

A la Dra. Martha Guerrero por haber confiado en mí para trabajar en este proyecto y por todos sus consejos y ayuda.

Al profesor Rafael Colás, por haberme ayudado y orientado SIEMPRE durante el desarrollo de esta tesis a pesar de todas las grandes dificultades que nos encontrábamos, además de darme la oportunidad de conocer otro país y valorar lo que tengo en mi vida, en verdad le estoy muy agradecido.

Al profesor Alberto Pérez Unzueta, por haberme ayudado con las aspectos tribológicos de esta tesis, mucho le estoy agradecido.

A mi amigo Alberto Pérez, por toda la ayuda que me brindó en otros aspectos diferentes a los tribológicos, pero que en verdad mucho me han ayudado y me van a ayudar en mi vida, además de estar siempre para escucharme, mil gracias por todo, y creo que "you are not an useless hippie".

A la empresa Hojalata y Lámina S.A. , en especial, en la división de Tecnología al Ing. Ricardo Viramontes y en Molinos Fríos al Ing. Félix Cárdenas y al Ing. Gerardo Salinas, así como a todo el personal que SIEMPRE nos apoyo en todo. Gracias por creer en este proyecto.

Al Dr. Carlos Lizcano por la revisión de esta tesis y por su apoyo comentarios sobre este trabajo.

A la profesora Mariana Staia y al profesor Elí Saúl Puchi, de la Universidad Central de Venezuela, por haberme recibido en Caracas y haberme ayudado en este proyecto de tesis, así mismo, quiero darle las gracias a los muchachos de los departamentos de Tribología, Acero y Aluminio, por haber hecho mi estancia en Venezuela muy agradable, en especial a Erwin y Kathy.

A mis compañeros en este proyecto Luis y Eduardo, por que juntos aprendimos mucho y aportamos un tanto más, en verdad gracias amigos y si valieron la pena todas las cortadas que nos hicimos y todos los esquimales que nos comimos.

A todos los profesores y compañeros del DIMAT.

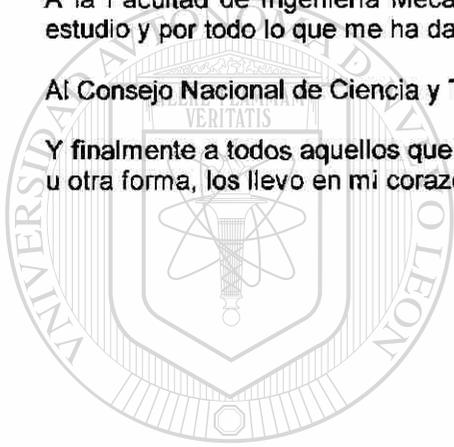
A mis amigos que entraron junto conmigo a la maestría, mi ahijado Chava, Adela y Álvaro, por todos los momentos de diversión que pasamos juntos.

A todo el "Wear Team", Julián, Eduardo ("men", te debo la ecuación del flujo de arena), y Efrén (el abrasivo, sucio, etc, etc), por toda su ayuda cuando empezaba mis estudios, y por ayudarme con algunos de los experimentos, mil gracias.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo brindado para realizar para este estudio y por todo lo que me ha dado mientras he estado en ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el GRAN apoyo para realizar este estudio.

Y finalmente a todos aquellos que haya olvidado mencionar, pero que han estado conmigo de una u otra forma, los llevo en mi corazón.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PROLOGO

El avance de la civilización es la gran sumatoria de los pequeños esfuerzos que se dan en tan variados ambientes como son nuestras propias casas, el taller, la escuela, las empresas, los gobiernos, etc. Cada esfuerzo es un pequeño componente para el beneficio de todos y cuando estos esfuerzos son el resultado de un trabajo conjunto, de una vinculación entre empresa y universidad, no hay duda del gran beneficio que pudieran tener. Al leer el presente trabajo, el lector notará, desde los primeros capítulos, lo importante y beneficioso que puede resultar una buena vinculación.

La época actual que vivimos, marcada por una fuerte tendencia a la globalización, soportada por un impresionante desarrollo en las vías de comunicación electrónicas, es importante remarcar que la riqueza de una país ya no puede ser solamente medida en términos del potencial de sus recursos naturales y materias primas. La riqueza actual de los países es el resultado del avance de sus pobladores, de su avance social, cultural, económico, moral y tecnológico. El resultado de años de estudio y de trabajo. El presente trabajo ofrece un sustancial aporte al mejor entendimiento de uno de los procesos industriales más importantes que caracterizan a nuestro desarrollo tecnológico, la fabricación del acero.

El acero es sin duda el material que más aplicación tiene en la vida del hombre, no hay objeto alguno en el mundo que no esté relacionado directa o indirectamente a esta aleación y por consiguiente sus aplicaciones crecen día a día. Aunque de igual manera lo hace la competencia de otros materiales. Por esta situación, los procesos de fabricación y transformación del acero, están obligados a ser lo más eficiente posible, orientados a tener una perfecta armonía en materia energética y ambiental, factores que en nuestros días hacen que un determinado proceso o producto sea competitivo en el mercado.

Actualmente la creciente tendencia en materia de optimización de los procesos, tanto de fabricación como procesamiento del acero, ha sido apoyada fuertemente con los avances computacionales basados en el desarrollo de modelos matemáticos cada vez más reales, todo esto con la finalidad de crear un lazo fuerte que una el proceso real y la modelación, para con esto mantener a los productos del acero dentro de un marco económico competitivo que sirva para el desarrollo de cada nación.

Este trabajo forma parte de una serie de investigaciones realizadas acerca del la modelación matemática y solución numérica del proceso de laminación en frío de acero el cual, contempla el análisis de aspectos microestructurales y superficiales de la cinta de acero proveniente del proceso de laminación en caliente y que posteriormente se lamina en frío, para obtener un producto de calidad, con inmejorables propiedades y aplicaciones variadas.

Se hace una concisa revisión bibliográfica, de las más recientes investigaciones realizadas, en materia de análisis de superficies y lubricación de la cinta de acero laminada en frío, así como también se otorga una descripción básica de los procesos de laminación y su lubricación, además de tratar el tema de análisis de superficie de materiales, todo esto es el marco teórico que respalda el trabajo de investigación que tiene como objetivo primordial cuantificar la rugosidad superficial de la cinta de acero laminada en frío mediante el empleo de técnicas de microscopía de fuerza atómica y perfilometría óptica por interferometría de luz blanca con la finalidad de relacionar el parámetro de rugosidad superficial de la cinta de acero, con respecto a variables operacionales del proceso, a lo largo del mismo, además de caracterizar la microestructura de aceros de bajo carbono, utilizando técnicas de metalografía cuantitativa. Este trabajo aporta la determinación del tamaño de grano promedio de los aceros, una de las variables de la cual depende el desarrollo de ecuaciones constitutivas que fundamenten el modelo matemático del proceso de laminación en frío. Ambos aspectos, microestructural y superficial, serán tomados en cuenta como variables fundamentales en dicho modelo.

Ricardo Viramontes Brown
San Nicolás de los Garza, N.L.
Junio del 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



INDICE

Dedicatoria	xi
Agradecimientos	xii
Prólogo	xiii
Capítulo 1	
INTRODUCCION.	1
Referencias Bibliográficas.	3
Capítulo 2	
LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS.	4
2.1 Historia de la laminación.	4
2.2 Formado mecánico de metales.	6
2.3 Aspectos generales de plasticidad.	8
2.3.1 Compresión plana.	8
2.4 Molinos de laminación.	11
2.4.1 Clasificación de los molinos de laminación.	11
2.5 Análisis de fuerzas en la laminación.	12
2.6 Fricción en los procesos de laminación.	14
2.7 Laminación en caliente de acero.	15
2.8 Laminación en frío de acero.	16
2.8.1 Teorías de la laminación.	17
2.8.1.1 Teoría de Von Karman.	17
2.8.1.2 Teoría de Bland y Ford.	19
2.9 Lubricación en el proceso de laminación en frío.	19
2.9.1 Importancia de la lubricación en la laminación en frío.	20
2.9.2 Mecanismos de lubricación.	20
2.9.2.1 Lubricación de frontera.	20
2.9.2.2 Lubricación hidrodinámica.	21
2.9.2.3 Lubricación de película sólida.	22
2.9.3 Efecto de la lubricación sobre el coeficiente de fricción en la laminación en frío.	22
Referencias Bibliográficas.	24

Capítulo 3

ANALISIS DE SUPERFICIES.	26
3.1 Naturaleza de las superficies.	26
3.2 Características de las superficies.	27
3.2.1 Rugosidad.	28
3.2.2 Ondulación.	28
3.2.3 Error de forma.	28
3.4 Técnicas de análisis de superficie.	29
3.4.1 Perfilómetro de aguja.	30
3.4.2 Interferometría óptica.	31
3.4.3 Microscopía de fuerza atómica.	32
3.5 Características de la rugosidad de superficie.	35
3.5.1 El valor Ra.	35
3.5.2 El valor Rms.	36
3.6 Análisis de parámetros de rugosidad en aceros laminados en frío.	36
3.6.1 Efecto de la rugosidad de la pieza de trabajo durante la laminación en frío.	37
3.6.2 Efecto de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza de trabajo.	37
3.6.3 Efecto de la microestructura de aceros sobre la rugosidad de la superficie.	38
3.7 Efecto de las condiciones de operación y lubricación sobre la superficie en la laminación en frío.	38
Referencias Bibliográficas.	42

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	44
4.1 Trabajo de campo.	44
4.1.2 Características operacionales de fabricación de los molinos.	46
4.1.3 Corte de las muestras.	47
4.1.4 Obtención de los parámetros de operación durante el proceso de laminación.	47
4.2 Caracterización microestructural.	47
4.2.1 Análisis químico.	48
4.2.2 Análisis metalográfico.	48

4.2.3 Determinación del tamaño de grano.	50
4.3 Ensayo de microdureza Vickers.	52
4.4 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de microscopía de fuerza atómica.	54
4.5 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de perfilometría óptica.	56
4.6 Influencia del proceso de decapado sobre las superficies de los aceros.	58
Referencias Bibliográficas.	59

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION 60

5.1 Análisis químico.	60
5.2 Análisis metalográfico.	60
5.2.1 Evolución de la microestructura durante el laminado en frío.	63
5.3 Tamaño de grano.	64
5.4 Resultados obtenidos de los ensayos de microdureza Vickers.	66
5.5 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por MFA con respecto a algunas variables del proceso.	68
5.5.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor.	70
5.5.2 Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerza de laminación.	72
5.5.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación.	75
5.6 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por Perfilometría Óptica con respecto a algunas variables del proceso.	70
5.6.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor.	81
5.6.2 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la fuerza de laminación.	83
5.6.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación.	86
5.7 Efecto del decapado de acero laminado en caliente, sobre la rugosidad superficial de la cinta de acero.	88
Referencias Bibliográficas.	92

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

93

6.1 Conclusiones.

93

6.2 Recomendaciones.

95

Anexo 1.

96

Anexo 2.

102

Anexo 3.

106

Listado de tablas

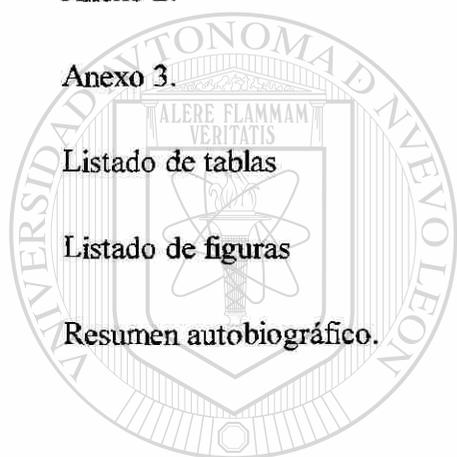
111

Listado de figuras

112

Resumen autobiográfico.

116



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La superficie de los materiales es la porción que está en contacto con el medio al cual se encuentran expuestos y las interacciones entre ellos son, por mucho, responsables del comportamiento de los materiales. La morfología de la superficie puede estar relacionada entre otros factores, a la microestructura, comportamiento mecánico, procesamiento y deformaciones al cual se ven sometidos los materiales.

Existen varios métodos para efectuar mediciones relacionadas con la rugosidad de la superficie de los materiales. Algunos usan microscopía electrónica, otros más principios ópticos, mientras que otros utilizan técnicas basadas en el contacto de algún dispositivo sobre la superficie a analizar y pueden ser de naturaleza térmica o eléctrica. La más alta resolución en el análisis de superficies se alcanza por técnicas de microscopía de tunelamiento o microscopía de fuerza atómica [1].

El proceso de laminación de acero se lleva a cabo por el contacto entre la pieza que se somete a deformación mecánica y los rodillos de trabajo. Debido a esta acción se desarrolla una fuerza de fricción que es definida como la fuerza tangencial común a los dos cuerpos en contacto cuando uno de ellos es sometido a la acción de una fuerza externa [2].

La rugosidad de la superficie de cinta de acero laminado en frío depende del modo de deformación, así como también si la cinta está en contacto con la herramienta de trabajo (rodillo de laminación), lo cual no se desea en el proceso, la función de los lubricantes empleados en la laminación es la de

prevenir el contacto directo meta-metal, pero transmitiendo la presión ejercida por la herramienta de trabajo hacia la cinta de acero para deformarla plásticamente. La rugosidad de la superficie entonces permite el atrapado mecánico del lubricante y, por lo tanto tiene influencia en el coeficiente de fricción desarrollado en el proceso de laminado [2,3,].

Durante la laminación de acero, la rugosidad de la lámina cambia en cada paso del proceso, debido a esto, la morfología de su superficie tiende a ser desordenada y una tanto caótica, por lo tanto, técnicas de caracterización de la topografía del acero empleando geometría de fractales han sido utilizadas para cuantificar las superficies [4].

El objetivo de este trabajo es el de cuantificar la rugosidad superficial de aceros laminados en frío, así como la caracterización microestructural de los mismos con la finalidad de relacionar estos parámetros con las condiciones operacionales de la laminación, con esto se pretende iniciar un trabajo que pueda llegar a establecer una relación entre la evolución de la rugosidad de la cinta de acero laminado en frío y el coeficiente de fricción que se presenta en este proceso mecánico.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

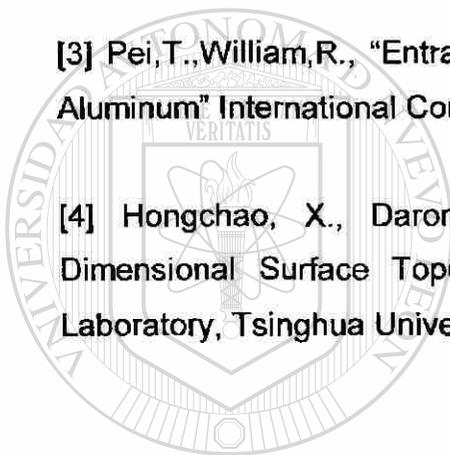
Referencias

[1] Hutchings, I.M. ,”Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials”, Edward Arnold, Londres U.K.1992.

[2] Ginzburg,V.,Ballas,R,”Fundamentals of Flat Rolling”, Manufacturing Engineering and Materials Processing, Merce! Dekeer 2000, Nva. York.

[3] Pei,T.,William,R., “Entrainment of Lubricant in the Cold Rolling of Steel and Aluminum” International Conference on Steel Rolling Sept 1980.

[4] Hongchao, X., Darong, C., Xianmei K. “Characterization on Three-Dimensional Surface Topography of Cold Rolled Strip, National Tribology Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 2

LAMINACION DE PRODUCTOS PLANOS

2.1 Historia de la laminación

Es muy difícil conocer con exactitud cuando fue realmente el inicio del proceso de laminación de productos planos y más aún lo es el hecho de saber quien o quienes comenzaron con el desarrollo de este proceso, más sin embargo indudablemente se sabe que al principio de su desarrollo, este proceso estuvo limitado al procesamiento de metales no ferrosos a temperatura ambiente como el plomo. Se tiene conocimiento de que fue mejorado a través del tiempo por artesanos que trabajaban el oro y piedras preciosas con fines ornamentales.

Durante el siglo XIV pequeños rodillos impulsados manualmente se utilizaron para procesar oro, plata y quizá plomo. Leonardo Da Vinci en el año de 1480 realizó el bosquejo de lo que él concebía como dos molinos de laminación, (Figs. 2.1 y 2.2) uno para procesar plomo y obtener hojas no muy delgadas y el otro para obtener barras. Estos son los planos de los cuales se tiene evidencia como las primeras ideas de laminación que existieron aunque no se conoce si realmente se hayan llegado a construir [1].

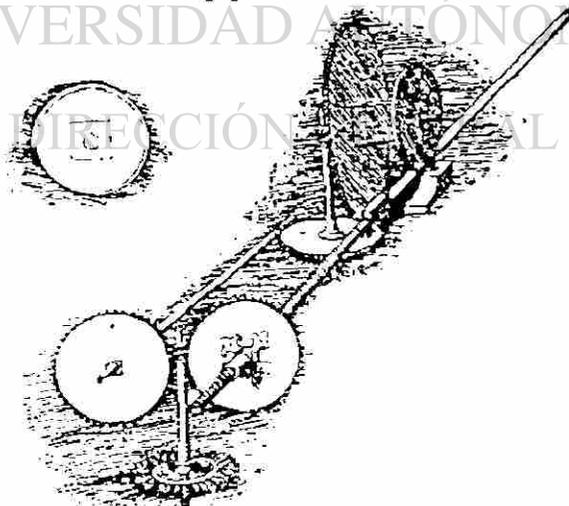


Fig. 2.1 Diagrama de Leonardo da Vinci de una máquina para formar plomo con fines ornamentales [1].

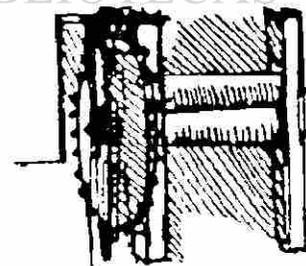


Fig. 2.2 Diagrama de un molino laminador por Leonardo da Vinci [1].

Se sabe además que hacia el final del siglo XVI existían ya por lo menos un par de instalaciones diseñadas y construidas incorporando ideas generales de la laminación. Se sabe también que un francés de apellido Brullier, en el año de 1553 produjo láminas de oro y plata que serían destinadas a acuñar monedas, también se tiene conocimiento de la acuñación de monedas, a partir de láminas de metales nobles en las cortes del Papa en 1581.

Durante el mismo período, se incrementó el uso del plomo en los techos y desagües de catedrales. Salomón de Caus fue un francés que en el año de 1615 construyó un molino manual para la fabricación de lámina de plomo (Fig. 2.3) que sería empleada en la construcción de órganos musicales [1].



Fig.2.3 Molino construido por Salomón de Caus para laminar plomo [1].

La práctica moderna de la laminación de productos planos data del año de 1783 cuando una patente fue adjudicada a Henry Cort de la compañía Fonteley Iron Mills en Inglaterra. Esta compañía utilizaba rodillos matizados para laminar barras de hierro, tal vez Cort no fue el primero en emplear rodillos matizados para la

fabricación de láminas de hierro, pero sí fue la primera persona que logró acoplar todos los conocimientos de varios de los procesos de aceración y de formado de metales que eran conocidos en aquel tiempo [1].

El proceso de laminación de productos planos ha sido enriquecido día con día, desde su inicio en los talleres de fabricación de joyerías, hasta en la actualidad en las grandes instalaciones siderúrgicas. Existen grandes avances tecnológicos en materia de tecnología de procesos de laminación (tanto en la laminación en caliente como en la laminación en frío), que sin duda estos procesos tienden a ser más eficientes y precisos, siendo esto debido a que la tendencia de los productos obtenidos por los procesos de laminación está encaminada a obtener productos con excelentes acabados superficiales y tolerancias dimensionales, lo cual se ha ido mejorando paulatinamente a través del paso del tiempo y con la adquisición de nuevos conocimientos.

2.2 Formado mecánico de metales

La habilidad de ser deformado plásticamente, es una propiedad de suma importancia para un metal de uso general en ingeniería. No sólo lo hace capaz ser tenaz y resistente en servicio, sino que también lo hace capaz de ser formado en el estado sólido a través de varios procesos de trabajado [2].

Se puede decir que el formado mecánico de un cuerpo se logra cuando éste se somete a la acción intencional de fuerzas externas de una magnitud necesaria para modificar la forma externa de la pieza.

Dos razones son las que hacen al formado mecánico de los metales materia de suma importancia:

- 1) El trabajado mecánico de los metales permite obtener formas que no pueden ser desarrolladas por otros medios o procesos, ya que resultaría costoso o ineficiente.

2) El trabajado mecánico permite obtener mejores propiedades mecánicas en metales y aleaciones (endurecimiento por deformación por ejemplo).

Cientos de procesos han sido desarrollados para aplicaciones específicas de trabajado de metales, de cualquier manera, estos procesos pueden ser reducidos a unas cuantas categorías dependiendo de la manera en que se aplican las fuerzas a la pieza de trabajo. Así la clasificación sería [2,3]:

- a) Procesos de compresión directa.
- b) Procesos de compresión indirecta.
- c) Procesos a tensión.
- d) Procesos a corte.

Este trabajo se enfoca al estudio los procesos de compresión directa. Dentro de estos procesos se encuentra al proceso de laminación y al proceso de forja (Figs. 2.4 y 2.5), siendo el primero de los mencionados el objeto primordial de estudio en este trabajo y que será explicado mas a detalle en secciones posteriores, pero de manera general se puede definir al proceso de laminación como *"El proceso que consiste hacer pasar un metal en medio de dos rodillos con la finalidad de obtener reducción en su espesor"*. En este proceso la pieza de trabajo está sometida a grandes esfuerzos de compresión debido a la acción de los rodillos de trabajo del molino de laminación, por lo tanto el modo de deformación al que está sometido el material, es el de compresión plana, este modo de deformación se tratará en la siguiente sección.

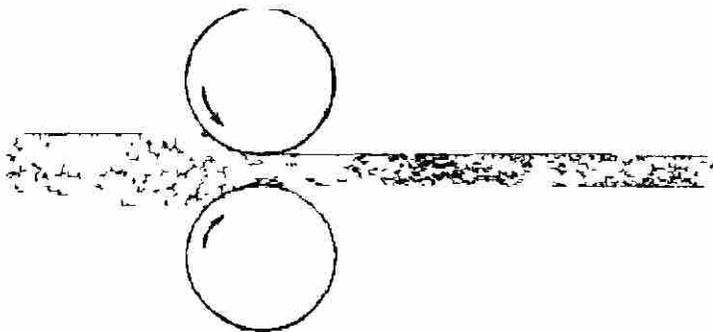


Fig.2.4 El proceso de laminación [2].

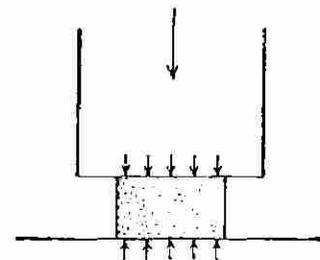


Fig.2.5 El proceso de forja [3].

2.3 Aspectos generales de plasticidad

2.3.1 Compresión plana

El modo de deformación predominante que se presenta en los procesos de laminación es el de deformación plana. En compresión plana, la mayor parte de reducción en altura que se logra en la pieza de trabajo se traduce en elongación en una dirección (dirección del frente de avance de la pieza de trabajo), por lo que el ensanchamiento en las direcciones laterales se considera despreciable.

Puede considerarse el caso de una sección rectangular de una pieza de trabajo, la cual posee altura "y" y longitud "l", (Fig. 2.6), y se toma un elemento de volumen de longitud infinitesimal "dx" y altura "y", el cual está sometido a una presión "p" aplicada sobre su superficie, de tal manera que la fuerza ejercida en el elemento es pdx .

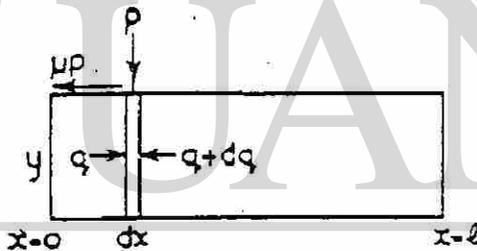


Fig.2.6 Esfuerzos de un elemento infinitesimal de volumen de una pieza en compresión plana [4].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En dicho caso la fuerza de fricción, f_k , producto del contacto entre las dos superficies con coeficiente de fricción μ es :

$$f_k = \mu p dx \quad (2.3.1)$$

La presión horizontal ejercida en el elemento es q , de uno de los lados del elemento en tanto que del otro es, $q+dq$, como se muestra en la Fig. 2.6,

Se hace un balance de fuerzas en la dirección x de tal manera que:

$$\Sigma F_x = 0 \quad (2.3.2)$$

la ecuación resultante sería:

$$2 f_k = y dq \quad (2.3.3)$$

pero como:

$$f_k = \mu p dx \quad (2.3.4)$$

resulta que:

$$2\mu p dx = y dq \quad (2.3.5)$$

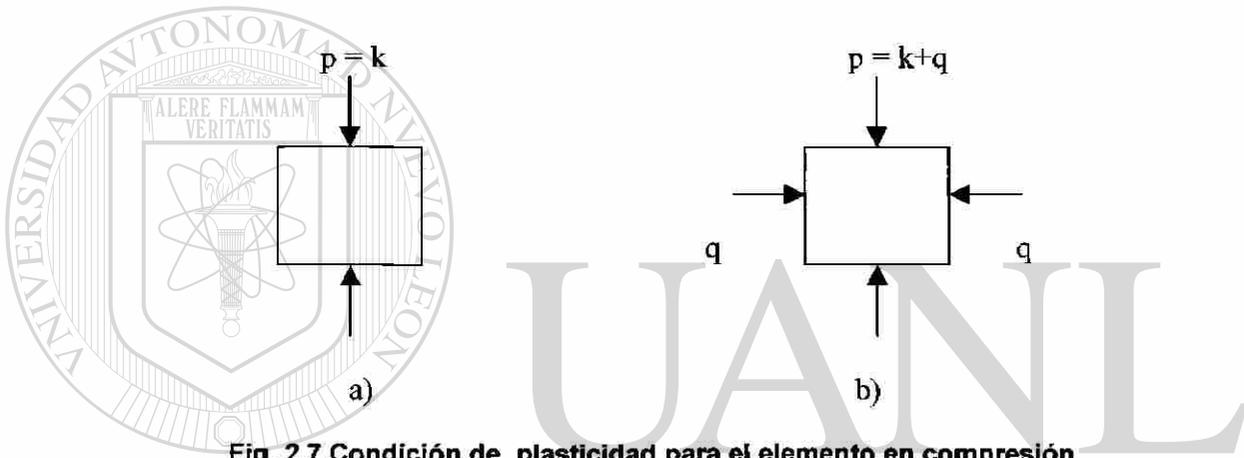


Fig. 2.7 Condición de plasticidad para el elemento en compresión plana [4].

La condición de plasticidad indica que la compresión de la pieza en la Fig. 2.7 a), necesita una fuerza vertical igual a k para poder comprimirla en el modo de deformación plana, además si una fuerza vertical q se aplica en la Fig. 2.7 b), la fuerza total de compresión estaría expresada por:

$$p = q + k \quad (2.3.6)$$

donde :

$$q = p - k \quad (2.3.7)$$

sustituyendo en la ecuación 2.3.5 y arreglando términos se llega a:

$$\frac{dp}{p} = \frac{2\mu dx}{y} \quad (2.3.8)$$

integrando 2.3.3 se tiene que :

$$\ln p = \frac{2\mu x}{y} + C \quad (2.3.9)$$

resolviendo para p:

$$p = ke^{\frac{2\mu x}{y}} \quad (2.3.10)$$

Como condición de frontera se tiene que $p = k$, en el borde la pieza.

Si se grafica p vs. x desde uno de los bordes de la pieza, en la Fig.2.8, por razones de simetría se alcanza un máximo a la mitad de la longitud y el valor de la presión ejercida está dado por [4]:

$$p = ke^{\frac{2\mu(1-x)}{y}} \quad (2.3.11)$$

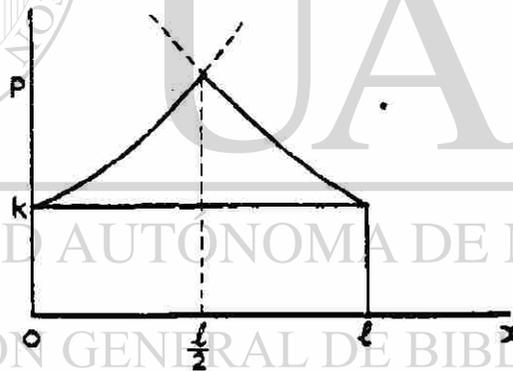


Fig. 2.8 Colina de fricción [4].

De la figura anterior se puede apreciar que la distribución de presión, tiene la forma de una colina desde una base de altura k , la cual representaría una distribución de presión uniforme para una compresión sin fricción. El área por debajo de esta curva representa la contribución que ejerce la fricción, a la presión vertical y , debido a este efecto, es conocida como colina de fricción [4].

2.4 Molinos de laminación

El trabajo efectuado contra la pieza de trabajo durante el proceso de laminación en frío es efectuado en una instalación llamada molino de laminación. Un molino de laminación es una estructura mecánica compuesta básicamente de los rodillos de laminación, rodamientos, así como un sistema de transmisión mediante el cual la potencia de una motor se lleva hacia los rodillos de trabajo para realizar el trabajo sobre la pieza a deformar, las fuerzas en los molinos de laminación son del orden de Mega Newton (MN).

2.4.1 Clasificación de los molinos de laminación

Los molinos de laminación se clasifican de acuerdo a la distribución física de los rodillos que contienen. Los arreglos más comunes son:

- a) Arreglo dos en alto Fig. 2.9 a.
- b) Arreglo tres en alto Fig. 2.9 b.
- c) Arreglo cuatro en alto Fig. 2.9c.
- d) Molino tipo Sendzimir Fig. 2.9 d.

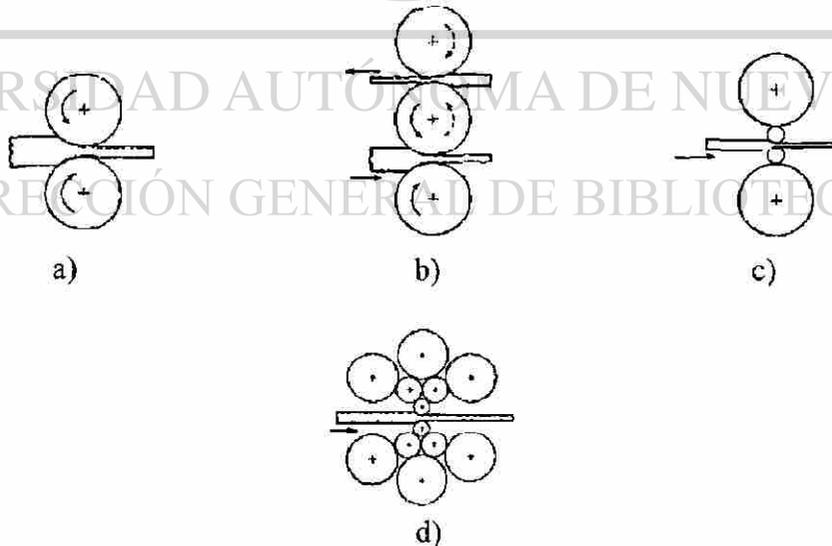


Fig.2.9 Arreglos Típicos de Molinos de Laminación[3].

Debido a la acción de los rodillos sobre la pieza de trabajo, se ejerce sobre esta última una fuerza compresiva que se denomina P_r , esto es en todo los puntos del arco de contacto entre la lámina y los rodillos, tal como se muestra en el punto a de la Fig. 2.10. El punto N se denomina punto neutro y en este punto se tiene la característica de que la velocidad a la que giran los rodillos y la velocidad con la que se mueve la lámina, es la misma.

Además de la fuerza P_r , se tiene la componente tangencial de la fuerza de fricción F , desarrollada debido al contacto de las dos superficies y actuando en la dirección que se muestra en la Fig. 2.10.

Por relaciones geométricas se encuentra que la longitud del arco de contacto L_p es:

$$L_p = [R(h_o - h_f)]^{1/2} \quad (2.5.1)$$

donde h_o y h_f representan la altura de la lámina a la entrada y salida los rodillos. Ahora bien si se divide la presión ejercida P_r entre el producto del ancho de la lámina b y la longitud del arco de contacto L_p se obtiene la presión específica del rodillo p definida como:

$$p = \frac{P_r}{bL_p} \quad (2.5.2)$$

En la ecuación anterior b representa el ancho de la lámina. La presión específica p en la ecuación 2.5.2 representa la presión a lo ancho de toda la lámina.

El ángulo α , ángulo de contacto o ángulo de la mordida, está comprendido entre el plano X-X, que es el plano de entrada de la pieza y el plano de salida Y-Y.

2.6 Fricción en los procesos de laminación

Si se analizan las componentes de la fuerza compresiva P_r y la fuerza de fricción F a partir de la Fig. 2.11.

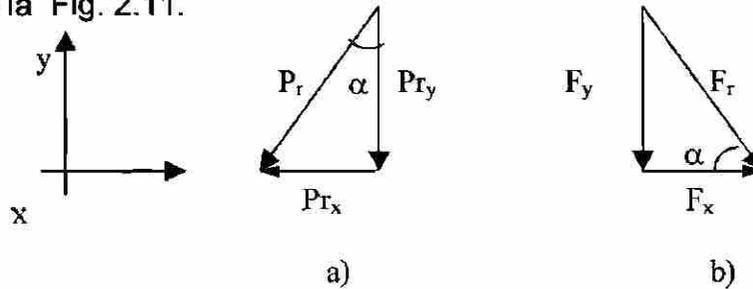


Fig. 2.11 Representación de fuerzas en la laminación.

Si se hace el balance de fuerzas en la dirección del eje x resulta que :

$$P_{r_x} = F_{r_x} \quad (2.6.1)$$

$$F \cos \alpha = P_r \operatorname{sen} \alpha \quad (2.6.2)$$

pero :

$$F = \mu P_r \quad (2.6.3)$$

por lo tanto:

$$\mu = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad (2.6.4)$$

$$\mu = \tan \alpha \quad (2.6.5)$$

Esta última ecuación expresa que la pieza de trabajo no entrará a ser laminada a menos de que el valor $\tan \alpha$ exceda el valor del coeficiente de fricción μ . El valor

del coeficiente de fricción μ depende de varios factores al momento de que se realiza el trabajo de reducción sobre la pieza, dentro de estos factores destacan :

- a) lubricación en el proceso,
- b) condiciones de geometría del proceso: diámetro de los rodillos, espesores de entrada de las piezas de trabajo, etc.
- c) condiciones de operación en el proceso como pueden ser: temperaturas, velocidades de laminación.
- d) características superficiales de las piezas de trabajo.

2.7 Laminación en caliente de acero

El proceso de laminación en caliente de acero es un proceso de formado mecánico mediante el cual se puede transformar directamente un lingote o planchón de este material en formas más delgadas como pueden ser barras, cinta, hojas, con la finalidad de poder dar un proceso posterior y obtener formas más simples o especiales como pueden ser láminas, productos no planos, etc.

En este proceso un lingote o un planchón de acero se calienta en hornos hasta una temperatura que es aproximadamente $0.6T_m$ (siendo T_m la temperatura absoluta de fusión del acero) y posteriormente se somete a velocidades de deformación que pueden alcanzar valores cercanos a $500s^{-1}$.

Debido a las condiciones de temperatura y rapidez de deformación el proceso se lleva a cabo de tal manera que el fenómeno de recristalización se realiza simultáneamente con la deformación [3].

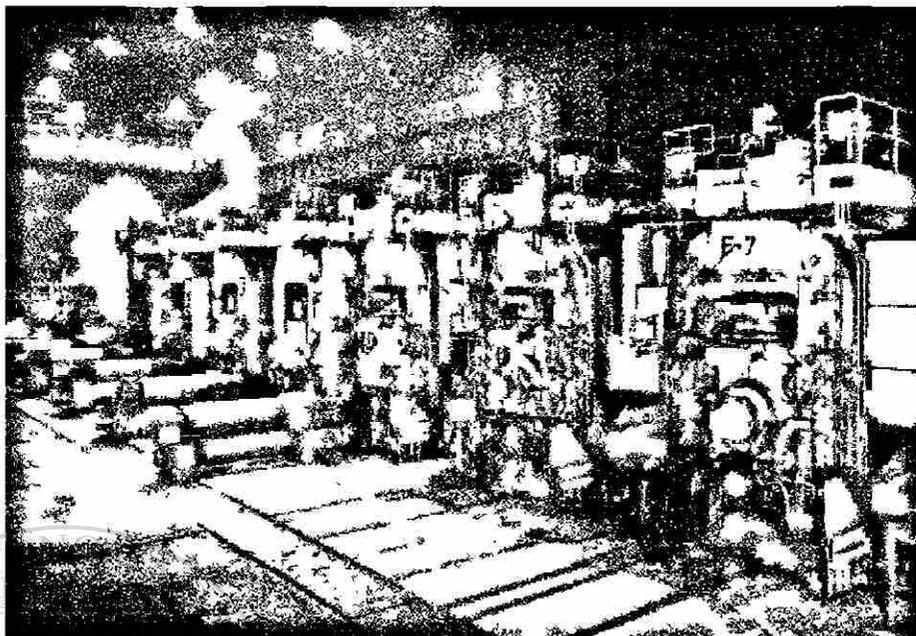


Fig.2.12 Proceso de laminación en caliente de acero. (Cortesía, Universidad de Sheffield, Inglaterra)

2.8 Laminación en frío de acero

Este proceso es utilizado para obtener productos con una mejor calidad superficial y excelentes tolerancias dimensionales en comparación con proceso de laminación en caliente. El proceso se lleva a cabo a temperaturas en las cuales el proceso de recristalización no se realiza (temperaturas no tan elevadas), de ahí proviene el término laminación en frío [2,3,6].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El objetivo del proceso de laminación en frío es la de obtener una cinta de acero de espesor determinado y con propiedades mecánicas deseadas. El proceso básicamente consiste en la reducción en espesor de material laminado en caliente y que antes de entrar al molino frío, pasa por una línea de decapado con ácido clorhídrico con la finalidad de eliminar la capa de óxido superficial resultado del trabajo en caliente.

La distribución de porcentajes de reducción se realiza en etapas comúnmente llamadas pasos de laminación, estas etapas están determinadas en función del

grado de endurecimiento por deformación al que se ve sometido el material en la etapa o paso anterior. En la actualidad es posible reducir material hasta cantidades superiores al 90 %, sucediendo esto durante los últimos pasos.

Es de hacer notar que las más grandes reducciones en el proceso de laminación en frío de acero se obtienen cuando se disminuye el diámetro de los rodillos de trabajo, aunque con esta acción se incrementen los esfuerzos de contacto entre rodillos, lo que traería como posible consecuencia un aumento en la velocidad de desgaste de éstos.

2.8.1 Teorías de la laminación

Son varias las teorías que se han propuesto para el análisis del proceso de laminación, todas con la finalidad de expesar el trabajo en frío ejercido en la pieza de trabajo, en función de la geometría del proceso, las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo y las condiciones de operación del proceso. A continuación se analizarán algunas de estas teorías.

2.8.1.1 Teoría de Von Karman

Von Karman analizó el elemento diferencial de la Fig. 2.13 del proceso de laminación tomado de la Fig. 2.10 bajo las siguientes condiciones [3,4]:

- a) Se considera el arco de contacto circular.
- b) El coeficiente de fricción μ es constante en todo el arco de contacto.
- c) No hay ensanchamiento lateral de la pieza de trabajo.
- d) La velocidad periférica de los rodillos es constante.
- e) Se sigue el criterio de energía de distorsión para deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma' \quad (2.8.1.1)$$

σ_1 =Tensión principal máxima.

σ_3 =Tensión principal mínima.

σ' =Fluencia de deformación plana.

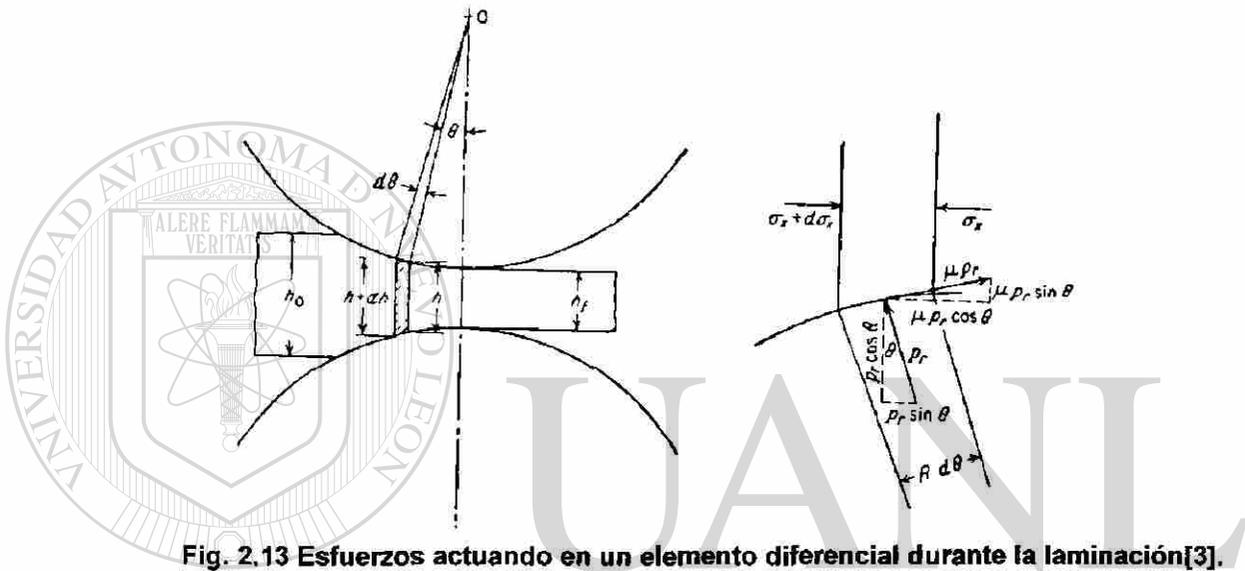


Fig. 2.13 Esfuerzos actuando en un elemento diferencial durante la laminación[3].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Efectuando el balance de fuerzas en el elemento diferencial se tiene que :

$$\sigma x + d\sigma x(h + dh) + 2\mu Pr R \cos\theta d\theta - \sigma x h - 2Pr \sin\theta d\theta = 0 \quad (2.8.1.2)$$

Simplificando:

$$\frac{d\sigma x h}{d\theta} = 2Pr R(\sin\theta \pm \mu \cos\theta) \quad (2.8.1.3)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Von-Karman, el signo \pm se debe al cambio de dirección de la fuerza de fricción en el punto neutro.

2.8.1.2 Teoría de Bland y Ford

La ecuación 2.8.1.2 propuesta por Von Karman ha sido simplificada por Bland y Ford, considerando que para un régimen bajo de fricción y para ángulos menores a 6° , el $\sin\theta = \theta$ y el $\cos\theta = 1$, resultando en:

$$\frac{d\sigma h}{d\theta} = 2 P_r R'(\theta + \mu) \quad (2.8.1.4)$$

El término R' es el radio real deformado de curvatura del rodillo, ya que durante el proceso de laminación, el rodillo tiende a deformarse elásticamente, por lo tanto este término se ajusta en base a sus propiedades físicas como lo son el módulo de elasticidad E , la relación de Poisson ν y las características geométricas de la pieza de trabajo.

2.9 Lubricación en el proceso de laminación en frío

El coeficiente de fricción que se desarrolla en el proceso de laminación en frío no había podido ser determinado hasta el año de 1954. Hasta antes de este tiempo se suponía que la teoría del proceso de cálculo del coeficiente en base a la geometría del modelo era correcta y este coeficiente sería el parámetro requerido para tener concordancia entre la teoría y la experimentación.

Esta consideración (cálculo del coeficiente de manera teórica) se justifica, siempre y cuando las condiciones de trabajo del proceso permitan conocer el valor de los esfuerzos generados en el mismo, pero sería más ventajoso si se pudiera medir directamente el valor de la fuerza de fricción.

2.9.1 Importancia de la lubricación en la laminación en frío

La lubricación durante la laminación en frío es una de las características más importantes de este proceso, es decir los lubricantes empleados así como las características superficiales tanto del acero al ser laminado, como las de los rodillos de laminación son los responsables de que el coeficiente de fricción desarrollado tenga un determinado valor.

La función primordial de la lubricación durante la laminación en frío, es básicamente la de prevenir el contacto metal-metal. Ya que no es posible observar directamente el comportamiento del lubricante empleado entre los rodillos de laminación y la cinta de acero, este comportamiento ha sido estudiado a través de métodos basados en mediciones realizadas en la fuerza de laminación y donde el coeficiente de fricción se calcula en base a las ecuaciones de la teoría de laminación [7].

2.9.2 Mecanismos de lubricación

2.9.2.1 Lubricación de frontera

En este tipo de lubricación, la fricción entre superficies de contacto está determinada por las propiedades físicas de ambas. El mecanismo de lubricación de frontera involucra la formación de una capa delgada en la interface sólido-sólido, como resultado de la adhesión de moléculas de un líquido polar [6]. A altas temperaturas la capa se vuelve paulatinamente desordenada por lo cual la fricción se incrementa a partir de una temperatura crítica [6,7].

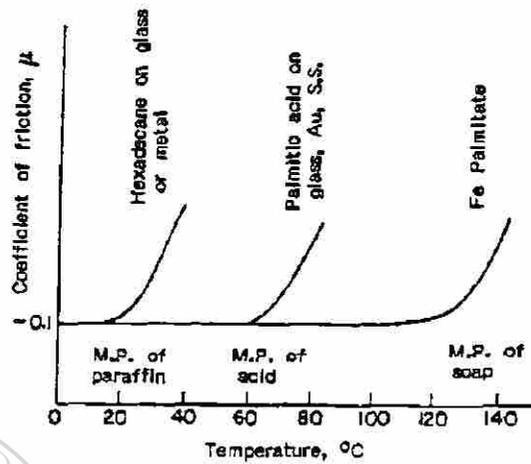


Fig.2.14 Temperaturas críticas en la lubricación de frontera[6].

2.9.2.2 Lubricación hidrodinámica

Este es el caso más simple de lubricación en donde se considera a una película que está en una interfase entre dos cuerpos y que es lo suficientemente delgada como para que la rugosidad de las superficies pueda ser ignorada[6,7].

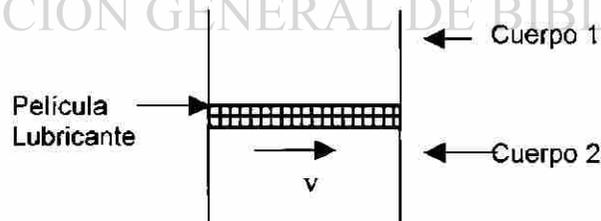


Fig. 2.15 Lubricación hidrodinámica [6].

En este tipo de lubricación el fluido lubricante evita que las dos superficies entren en contacto directo y éste se mueve con una velocidad v , como resultado del movimiento relativo existente entre las dos superficies. En la laminación en frío el

trabajo que se efectúa sobre la pieza de trabajo es transmitido a ella debido a la presión hidrostática desarrollada en el fluido lubricante.

2.9.2.3 Lubricación de película sólida.

Este tipo de lubricación (Fig.2.16) es empleado cuando se tienen superficies totalmente en contacto, en este caso se tiene la formación de una película sólida que protege a las dos superficies, en muchas ocasiones esta película puede ocasionar problemas posteriores a las superficies (corrosión, desgaste) pero en general, podemos clasificar a las capas sólidas como:

- a) Películas de óxido.
- b) Recubrimientos metálicos.
- c) Películas de material polimérico.

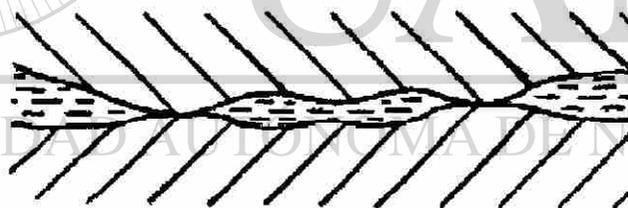


Fig.2.16 Lubricación de película sólida [6].

2.9.3 Efecto de la lubricación sobre el coeficiente de fricción en la laminación en frío

Estudios se han realizado con la finalidad de determinar la influencia del lubricante en el coeficiente de fricción en la laminación en frío [8], como se había mencionado con anterioridad. Bland durante los años 50, empleó un método

basado en relaciones geométricas del proceso y propuso que si el par desarrollado por los rodillos es conocido, junto con la fuerza de laminación, es posible calcular μ en base a la ecuación 2.9.3.1[8]:

$$\mu = \frac{T}{PR} \quad (2.9.3.1)$$

donde:

μ =coeficiente de fricción.

T =Par.

P =Fuerza de laminación.

R =Radio del rodillo.

Estos experimentos se llevaron a cabo empleando lubricantes tales como:

- a) Jabones.
- b) Sustancias ácidas.
- c) Hidrocarburos (parafina, aceites comerciales, lanolina)
- d) Agua.
- e) Aceites naturales (aceite de oliva, ricino).

Bland encontró que los ácidos y jabones disminuyen el coeficiente de fricción de una manera eficiente pero el acabado superficial del acero al final de la laminación era pobre, en cambio con los aceites naturales y la lanolina se obtuvieron los valores mas bajos de μ , pero con resultados desastrosos en el acabado superficial del material [8].

El coeficiente de fricción no sólo depende del tipo de lubricante, la rugosidad superficial es un factor que influye en la acción de retención del lubricante a lo largo del proceso, es por esto que el análisis de la superficie de los productos laminados antes, durante y al final del mismo es de suma importancia. El aspecto superficial en la laminación se discute con más detalle en el Capítulo 3.

Referencias Bibliográficas

[1] William, R., "Cold Rolling of Steel", Manufacturing Engineering and Materials Processing /2, Marcel Dekker Inc 1978 Nva York.

[2] Cotrell. A., "An Introduction to Metallurgy", Edward Arnold, 1967 Londres.

[3] Dieter, G., "Mechanical Metallurgy", Materials Science and Metallurgy Mc Graw Hill

[4] Hesseberg, W.C.F., "Pressure Distribution in Plane Compression", Research on the Rolling of Strip The British Iron and Steel Research Association, Londres 1958.

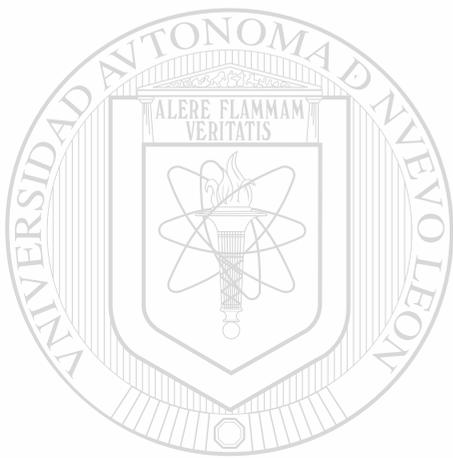
[5] Colás, R., "Laminación de productos planos", Doctorado en Ingeniería de Materiales FIME-UANL, México, Noviembre de 1997.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

[6] Ginzburg, V., Ballas, R., "Fundamentals of Flat Rolling", Manufacturing Engineering and Materials Processing, Mercel Dekeer 2000, Nva York.

[7] Azushima, A., Kihara, J., Miyagawa, M., "Determination of Lubrication Mechanism by means of Surface Qualification of Cold Rolled Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japon.

[8] Ford H., Witton P., "Surface Friction and Lubrication in Cold Strip Rolling",
Research on the Rolling of Strip The British Iron and Steel Research Association,
Londres 1958.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE SUPERFICIES.

3.1 Naturaleza de las superficies

Las propiedades de la superficie de los materiales ingenieriles dependen de muchos factores. Es por esta razón que el estudio de la superficie de los materiales es sumamente importante, ya que es la porción que está en contacto directo con el medio al cual está expuesta y en la mayoría de las ocasiones de ella depende el desarrollo de algún fenómeno físico o químico de un proceso.

Las características superficiales de los materiales están relacionadas entre otras cosas, a la microestructura del material y al modo por el cual fue procesado [1]. Es por eso que las condiciones de operación en los procesos de obtención y de trabajo de los materiales, constituyen variables de gran importancia para determinar algunas de estas características.

La Fig. 3.1 representa la evolución de la superficie de un metal que fue maquinado, en donde se muestran 4 capas que comprenden, desde el material original hasta la formación de capas como resultado de la exposición a un medio.

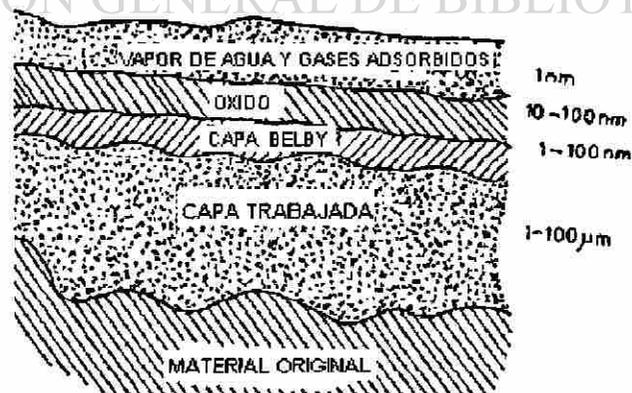
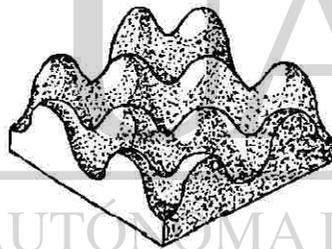


Fig. 3.1 Representación esquemática de la superficie de un metal [2].

El comportamiento mecánico de zonas que tiene diferentes tamaños de grano (en el caso de los metales) es distinto, debido a esto la textura de la superficie de un material contiene una serie de irregularidades con diferentes amplitudes y frecuencias de aparición [2].

3.2 Características de las superficies

La superficie de un material empleado para una tarea específica depende del proceso de formado, colado, moldeo, etc. Cuando un material se analiza en una escala lo suficientemente fina, es posible apreciar irregularidades de su superficie, las cuales a simple vista no podrían ser apreciadas, por ejemplo, la superficie de un metal, que ha sido pulido para obtener un acabado espejo, cuando se analiza por técnicas adecuadas, presentaría irregularidades superficiales que comúnmente son llamadas asperezas Fig. 3.2 [2,3].



3.2 Asperezas de una superficie supuestamente lisa [2,3].

Las características geométricas de la textura de la superficie de un material dependen fuertemente del proceso mediante el cual fue obtenido y, en general, la textura de un material está formada por tres componentes que son : rugosidad, ondulación y error de forma. Un perfil de superficie se considera como la suma de estas tres características [2].

3.2.1 Rugosidad

El término rugosidad de una superficie hace referencia a las irregularidades superficiales en pequeña escala y que por lo tanto no son apreciables a simple vista [2,3], la rugosidad es caracterizada por pequeños valles y crestas de una corta longitud de onda, y que varían en amplitud y desplazamiento en distancias mas grandes que las distancias de separación entre sus átomos Fig. 3.3

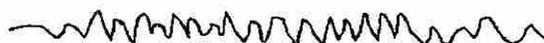


Fig.3.3 Rugosidad de una superficie

3.2.2 Ondulación

La ondulación de una superficie se considera como la irregularidad de las superficies que poseen un longitud de onda mucho mayor en comparación a la de las irregularidades que forman las rugosidad [2] Fig.3.4.



Fig.3.4 Ondulación de una superficie [2].

A menudo estas irregularidades surgen como resultado de operaciones como: tratamientos térmicos, vibraciones mecánicas y errores en los procesos de producción, por mencionar algunos.

3.2.3 Error de forma

El error de forma se considera como una desviación muy alejada de la forma original o esperada de una superficie [2] Fig.3.5.



Fig.3.5 Error de forma de una superficie [2].

3.4 Técnicas de análisis de superficie

Son varias las técnicas que a través de los años se han desarrollado con la finalidad de determinar la representación gráfica de la superficie de los materiales en la ingeniería o su topografía. El significado de la palabra topografía, hace referencia a la manera de como se puede representar una superficie en la dimensión.

En sus inicios el análisis de una superficie se limitaba solamente al estudio de parámetros bidimensionales obtenidos mediante el análisis de perfiles, pero con el paso del tiempo, y gracias a los grandes avances en materia de la electrónica y la computación, fue posible obtener la representación tridimensional de una superficie. Una imagen en la que se mostraba las condiciones en las que se encontraba una articulación artrítica del cuerpo humano mediante la topografía de una superficie fue obtenida por Thomas y Sayles [4], durante la década de los setenta, en la Fig. 3.6 se muestra esta imagen.

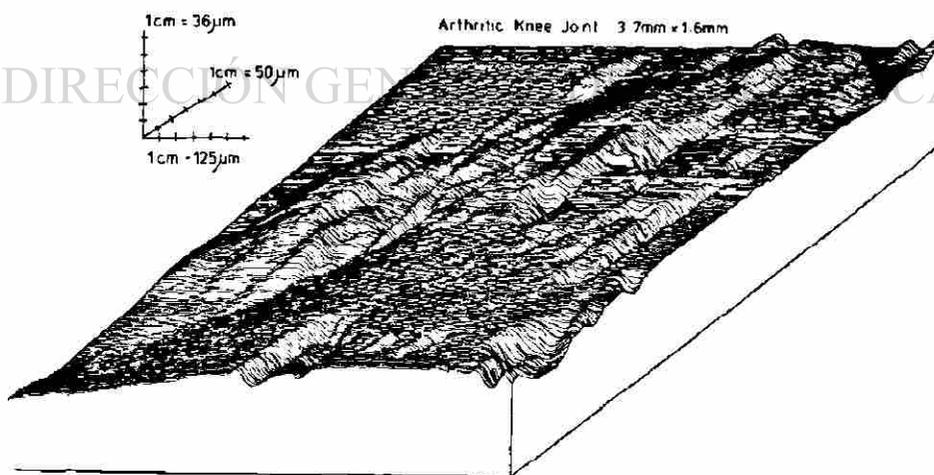


Fig.3.6 Representación topográfica de la superficie de una articulación humana artrítica [4].

3.4.1 Perfilómetro de aguja

El perfilómetro de aguja es uno de los métodos más comunes de medición de superficie [3], Fig.3.7. El principio de este instrumento se basa en el movimiento deslizante de una aguja sobre la superficie de análisis, los desplazamientos verticales de la aguja se convierten a una señal eléctrica mediante un transductor, y, al ser amplificada esta señal, se acciona el mecanismo mediante el cual se grafica el perfil seguido por la aguja. La gráfica obtenida representa el desplazamiento vertical de la aguja en función de la distancia que se recorre a través de la superficie[4].

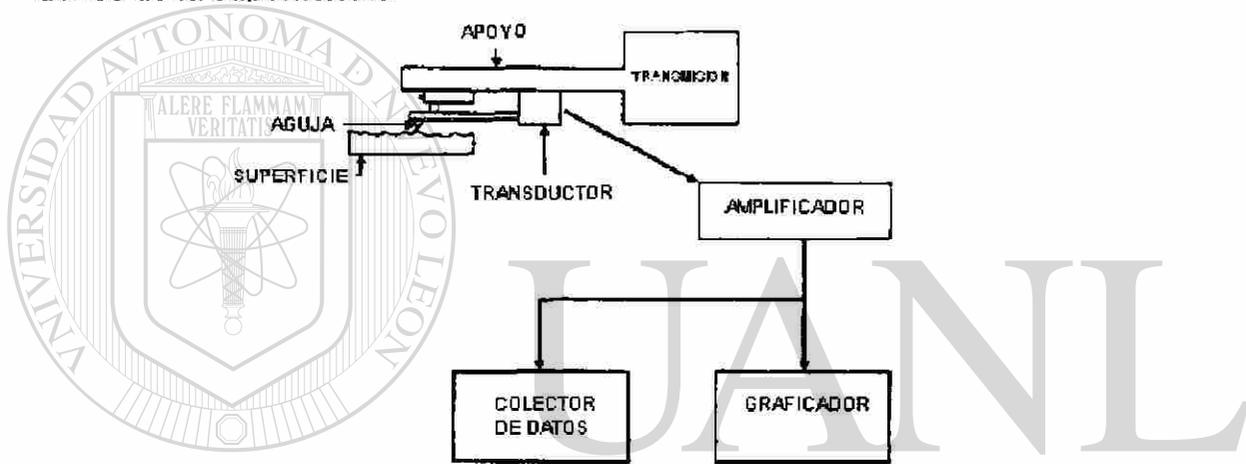


Fig.3.7 Perfilómetro de aguja [3].

Debido a que los desplazamientos en la dirección horizontal son mucho mayores que los que se tienen en la dirección vertical, la magnificación en esta última dirección debe ser mayor, esto con la finalidad de representar el perfil de una manera adecuada Fig.3.8.

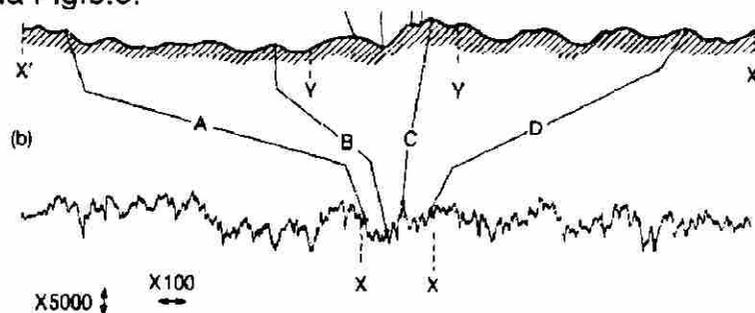


Fig.3.8 Perfil de una superficie analizada mediante un perfilómetro de aguja [3,5].

Una gran desventaja de este método de análisis puede ser el que la aguja ,debido a su forma y tamaño, no pueda penetrar algunas regiones en la superficie, lo que traería como consecuencia, la aparición de regiones de aspecto plano en el perfil.

3.4.2 Interferometría óptica

Este aparato (Fig.3.9) utiliza la técnica óptica basada en el principio de interferencia que existe entre dos haces de luz, los cuales inciden sobre la superficie de la muestra a analizar y que al ser reflejados por ésta crean un patrón de franjas, el cual es captado por un arreglo lineal de foto diodos enlazados a un microprocesador. Este arreglo se puede combinar con un arreglo perpendicular de foto diodos, para con esto obtener la variación en altura que tiene la superficie.[3]

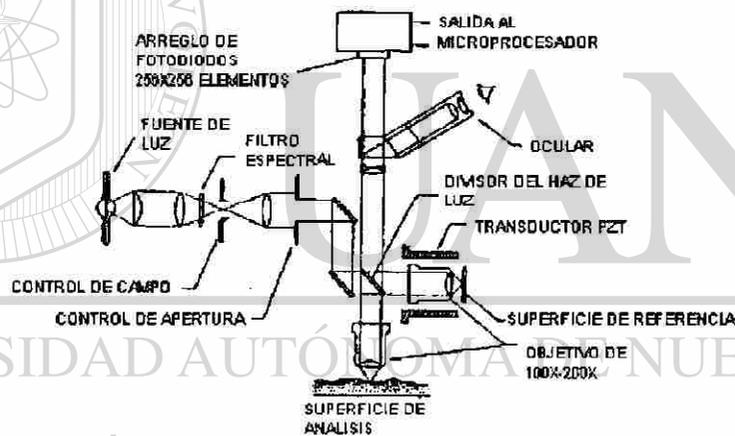


Fig.3.9 Diagrama esquemático de un interferómetro óptico [3].

Las intensidades de la luz requerida en la superficie son calculadas en base a la ecuación 3.4.2.1[5].

$$n\lambda = 2\mu t \cos \theta \quad (3.4.2.1)$$

donde :

n = constante de iluminación.

λ =longitud de onda del haz.

t = espesor entre la superficie recubierta con material conductor.

θ = ángulo del haz incidente con respecto a la normal.

3.4.3 Microscopía de fuerza atómica

El microscopio de fuerza atómica (MFA por su siglas en español) es un instrumento adecuado para analizar superficies de los materiales ingenieriles, no sólo se pueden analizar superficies con este instrumento, es posible además identificar fases presentes en materiales y otros constituyentes. En la actualidad su aplicación en diversas ciencias, crece día con día. El principio de funcionamiento se basa en las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los átomos de la materia, Fig. 3.10.

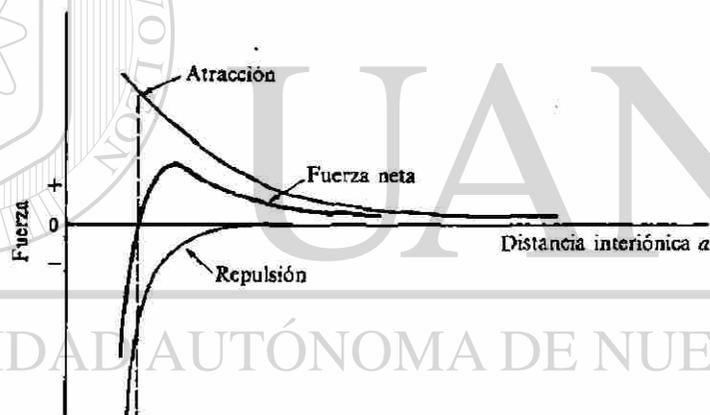


Fig.3.10 Separación entre átomos que corresponde al estado de equilibrio [9].

El instrumento cuenta con una punta la cual está fija a una barra cantiliver y que oscila sobre la superficie a estudiar. Conforme la punta toca la superficie del material, su posición se refleja y se capta por un arreglo de foto diodos mediante los cuales se mide la diferencia en señal y con esto el movimiento que sigue la punta.

El MFA cuenta básicamente con dos modos de funcionamiento el de contacto y el de no contacto. En el modo de contacto, como su nombre lo indica, la punta está en contacto cercano a la muestra a analizar. El recorrido de la punta sobre la superficie sigue un barrido en dos direcciones ortogonales (x,y) Por contacto se entiende que se está ubicado en el régimen repulsivo de la curva de fuerzas intermoleculares de la Fig. 3.10.

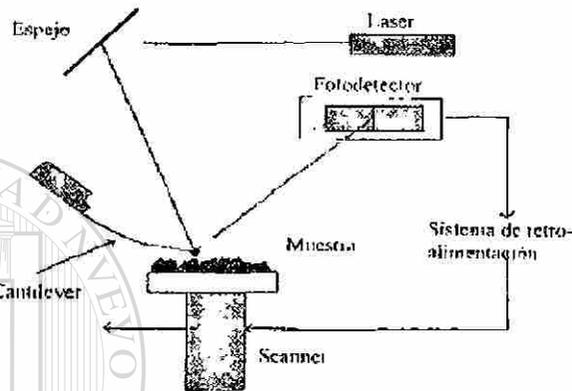


Fig.3.11 Principio de funcionamiento del MFA.

El modo de no contacto consiste en mantener a la punta y al cantilever oscilando a través de la superficie de la muestra a una distancia tal que la interacción entre los átomos y el haz no se encuentran en el régimen repulsivo de la curva de fuerzas intermoleculares. Este modo de operación es difícil de mantener en condiciones atmosféricas normales debido a que cualquier gota de agua o impureza del aire, puede afectar la medición o el barrido de la muestra.

El microscopio de fuerza atómica puede proporcionar una imagen en dos dimensiones, a partir de la cual (Fig.3.12) se pueden hacer mediciones y cálculos con la ayuda de paquetes computacionales, desarrollados con el fin de obtener parámetros que pueden ser rugosidades, volúmenes, áreas, profundidades, etc.

Es posible obtener también una imagen topográfica, que muestre la superficie de la muestra analizada, con esto es posible identificar un sin número de

características que en un momento dado, contiene un material de ingeniería Fig. 3.13.

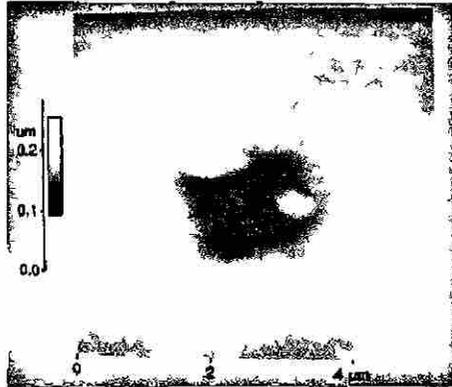
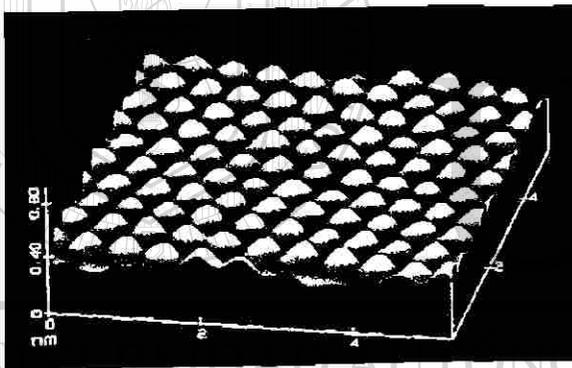
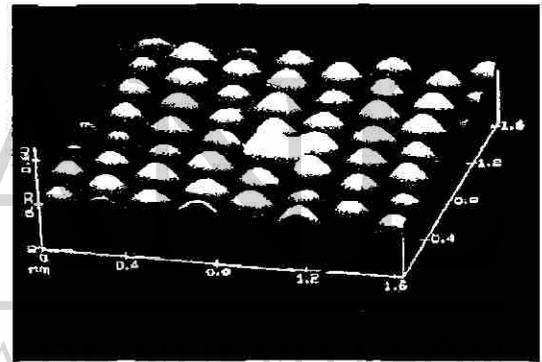


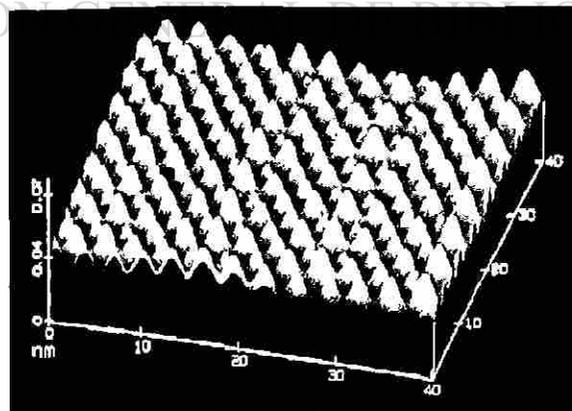
Fig.3.12 Imagen bi-dimensional obtenida por MFA que muestra precipitados formados en una aleación de aluminio [12].



a)



b)



c)

Fig.3.13 a) La superficie de una grano de sal de mesa b) Irregularidad atómica en una superficie de grafito. c) Topografía de una superficie de rodio la cual tiene átomos de oxígeno adsorbidos en ella [11].

3.5 Características de la rugosidad de superficie

Los parámetros que se emplean para la caracterización del perfil de rugosidad de una superficie, son variados entre ellos destacan el valor Ra y el valor Rms [3,6].

3.5.1 El valor Ra

Si se toma un perfil de longitud "L" como el de la Fig. 3.14, a través del cual pasa una línea media, que está trazada de tal manera que, tanto por encima como por debajo de ella, se tiene áreas iguales, esta línea es conocida como línea central promedio.

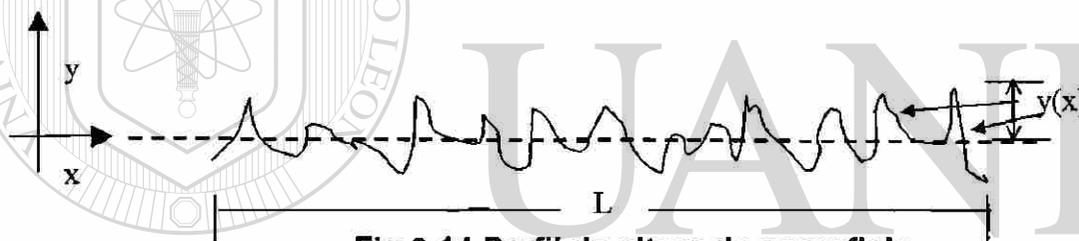


Fig.3.14 Perfil de altura de superficie.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El valor Ra se define entonces como la desviación media aritmética de las alturas "y" de la superficie a lo largo de la línea media del perfil. Matemáticamente se expresa por la ecuación 3.5.1.1.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \quad (3.5.1.1)$$

3.5.2 El valor Rms

El valor de rugosidad Rms de un superficie se define como la raíz cuadrada de la desviación media y se representa por la ecuación 3.5.2.1 como :

$$Rms = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (3.5.2.1)$$

Este parámetro está ligado al valor de Ra, si se considera que la superficie sigue un comportamiento Gaussiano de distribución de alturas mediante la ecuación

3.5.2.2:

$$Rms = 1.25Ra \quad (3.5.2.2)$$

3.6 Análisis de parámetros de rugosidad en aceros laminados en frío

En el proceso de laminación en frío se tiene el paso de material proveniente de un molino caliente a través de rodillos de laminación con la finalidad de llevar el material hasta un espesor deseado además de imprimirle gran resistencia debido al proceso de endurecimiento por deformación. El acero antes de ser laminado en frío, pasa por una línea de decapado, en la cual se remueven los óxidos resultantes de la laminación en caliente, durante este proceso. Debido a la acción de remoción del óxido con ácido clorhídrico, es posible que la rugosidad de la superficie de la cinta de acero sea afectada. Se han realizado estudios con la finalidad de determinar el estado de la rugosidad de la cinta de acero antes de que sea laminada, así como al momento de que se efectúa trabajo sobre ella en laminación en frío.

La rugosidad de la superficie de un material, depende en gran parte del proceso de trabajo o transformación al que se somete.

3.6.1 Efecto de la rugosidad de la pieza de trabajo durante la laminación en frío

Como se había mencionado con anterioridad, la rugosidad de la pieza de trabajo cambia conforme se ejerce trabajo sobre ella. La función primordial de la rugosidad de la superficie de la lámina de acero, es la de permitir el atrapado mecánico del lubricante empleado para evitar el contacto directo rodillo-lámina [6]. Superficies de piezas de laminación en frío que permitan que el atrapado mecánico de lubricante se lleve formando capas paralelas a la dirección de deformación, son las que favorecen que el lubricante escape con relativa facilidad y que por lo tanto, se propicie el contacto rodillo-lámina, lo que trae como consecuencia un acabado no deseado en la superficie y un incremento en la rugosidad de la lámina de acero [6].

3.6.2 Efecto de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza de trabajo

Estudios [7,8] han sido realizados para observar la influencia de la rugosidad de los rodillos sobre la pieza al ser laminada. Es de hacer notar, que en este trabajo se ha mencionado que mecanismos de lubricación son empleados o desarrollados para evitar el contacto metal-metal y que durante la laminación se presenta condiciones de lubricación idóneas que evitan este fenómeno.

Si estas condiciones no son favorables para asegurar la existencia de los mecanismos de lubricación, la cinta de acero al ser laminada entraría en contacto con la pieza de trabajo lo que traería como consecuencia el aumento en la fricción desarrollada en el proceso y aumento en la rugosidad de la cinta. Este efecto ha sido estudiado por Schey [6], encontrando que la rugosidad de los rodillos de laminación tiene efecto sobre la pieza de trabajo siempre y cuando se empleen lubricantes de baja viscosidad. Se encuentra, en estas condiciones que el

acabado superficial de los rodillos de laminación influye sobre la rugosidad de la cinta de acero.

3.6.3 Efecto de la microestructura de aceros sobre la rugosidad de la superficie

Aceros que tiene una estructura fcc tienen una tendencia a ser más rugosos que aquellos materiales que tiene una estructura bcc, esto es por que estos últimos tiene un número limitado de sistemas de deslizamiento y la rugosidad es función de la deformación. En general el proceso por el que una superficie bajo deformación tienda a ser rugosa se explica como sigue[6]:

a) A bajas deformaciones, el fin de los planos de deslizamiento en la superficie de contacto, se manifiesta como una estructura de líneas paralelas.

b) El proceso mediante el cual una superficie se hace rugosa, existe aún en condiciones de deformación homogénea, por que la deformación de los granos individuales varía como función de su orientación cristalográfica, por lo tanto algunos granos se deformarán, mientras el lubricante forma paquetes de separación entre superficies y la rugosidad de la superficie incrementa.

c) Cuando las piezas de trabajo están completamente separadas por lubricante, la rugosidad de la superficie sería la misma como si estuviera en libre deformación.

3.7 Efecto de las condiciones de operación y lubricación sobre la superficie en la laminación en frío

Se realizó un estudio [8] años atrás, con la finalidad de encontrar relaciones entre la lubricación adecuada durante la laminación en frío, la fricción durante el proceso y la influencia de la superficies sobre estos parámetros, en base a variables en el

proceso como velocidades, fuerzas de separación, además de aspectos metalúrgicos, como tamaños de grano y porcentajes de deformación, mucha importancia se le ha dado también a los mecanismos de lubricación que se desarrollan durante la laminación en frío.

Un ejemplo de estos trabajos es el que realizó Azushima en 1980, el estudió las condiciones durante el proceso de laminación que promueven el contacto entre los rodillos de laminación y la pieza de trabajo, mediante el estudio de los acabados superficiales de las láminas al final del proceso de laminación, habiendo previamente registrado los parámetros superficiales ($Ra_{m\acute{a}x.}$) tanto del rodillo como de la pieza [7].

El valor máximo de rugosidad de rodillos fue de $0.8\mu m$ y el de la cinta de $0.25\mu m$, la cinta se sometió a tres distintas velocidades de laminación de 0.5 m/min, 60 m/min y 800 m/min. La Fig. 3.15 muestra la gráfica de variación de rugosidad con respecto a la reducción del material [7].

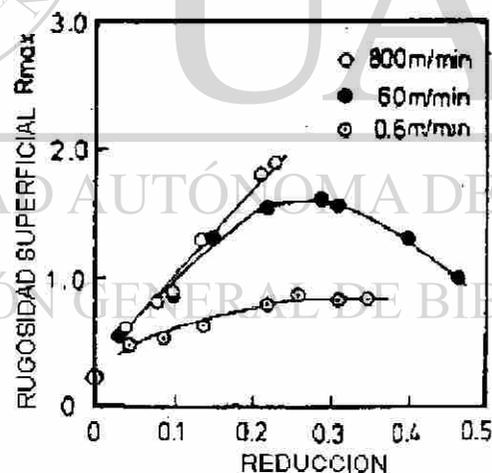


Fig. 3.15 Rugosidad superficial en función de la reducción a varias velocidades de laminación [7,8].

De la gráfica anterior se concluye que bajas velocidades de laminación la cinta por encima del 0.2 de reducción tiene una rugosidad constante de $0.85\mu m$ y que por lo tanto los rodillos estuvieron en contacto con el material. A la velocidad de

800 m/min la rugosidad de la cinta incrementa linealmente con la reducción y por lo tanto esta se deforma plásticamente sin ser tocada por los rodillos. A la velocidad de 60 m/min se tiene una combinación de los dos efectos que se presentan a las velocidades máxima y mínima [7,8].

Este comportamiento se explica en la Fig. 3.16. En el caso de altas velocidades de laminación, el movimiento relativo entre cinta y rodillos obliga al lubricante a entrar y evitar el contacto directo metal-metal entre la cinta y los rodillos, la cinta se deforma plásticamente sin ser tocada por los rodillos, entonces el régimen de lubricación sería el de lubricación hidrodinámica Fig.3.16 a). En cambio, a bajas velocidades de laminación, el lubricante no adquiere una velocidad adecuada y por lo tanto sólo una pequeña porción sería atrapado por las asperezas de la lámina y, por lo tanto, el rodillo tocaría a la pieza de trabajo incrementando su rugosidad Fig.3.16 b). El comportamiento a velocidades intermedias puede explicarse de forma similar a los dos casos anteriores siendo propiciado por la formación de una capa un poco más delgada que el caso de laminación a alta velocidad Fig.3.16 c). Se encontró también que el espesor de la capa de lubricante esta dado por la ecuación 3.7.1.1 que expresa:

$$hc = \frac{1}{2}Rr + \frac{1}{2}Rc \quad (3.7.1.1)$$

hc = Espesor de la capa de lubricante.

Rr = Rugosidad de los rodillos.

Rc =Rugosidad de la cinta.

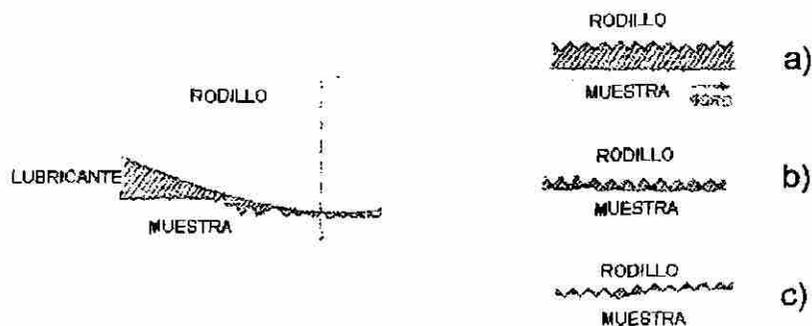


Fig.3.16 Velocidades altas (a), intermedias (b), bajas (c) [7].

Se ha observado que las condiciones superficiales tanto de la cinta de acero, al ser laminada en frío así como de los rodillos, son factores muy importantes que afectan el proceso de laminación en frío. Mucho del esfuerzo en este campo, ha sido enfocado al estudio de las características de los lubricantes empleados en la laminación, tal es el caso de los estudios realizados por Bland, y que fueron mencionados en el Capítulo 2, o los estudios realizados por Sakai, Saito y Kato, en donde estudian el estado de lubricación a través del análisis de la superficie de la cinta de acero laminada en frío, ellos establecen que cuando la velocidad de laminación aumenta, el incremento de la capa del lubricante se ve favorecido y con esto, se tienen condiciones hidrodinámicas que impiden el contacto metal-metal y, por lo tanto, que favorecen la realización de un proceso correcto de laminación. Lo anterior se fundamenta en las propiedades del lubricante empleado [8].

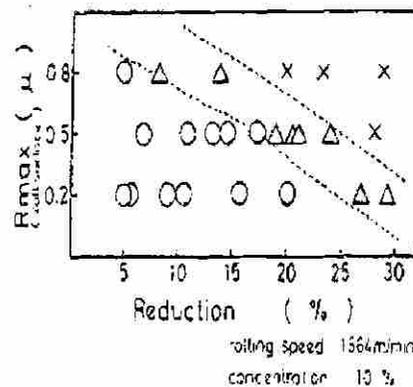
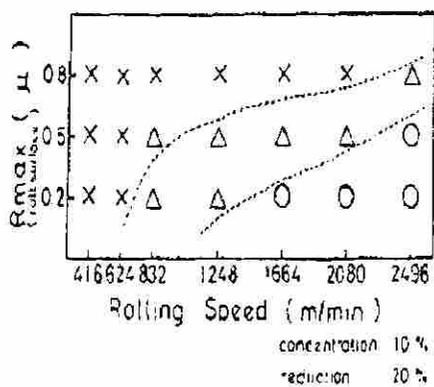
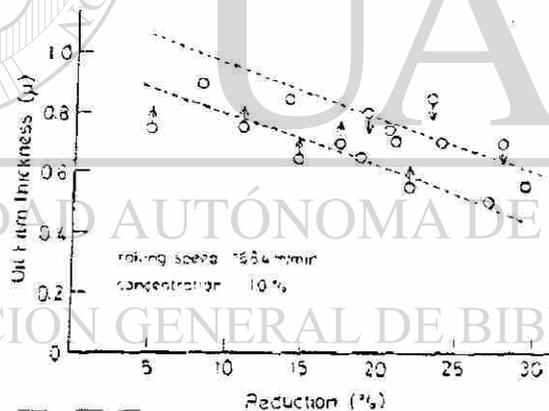
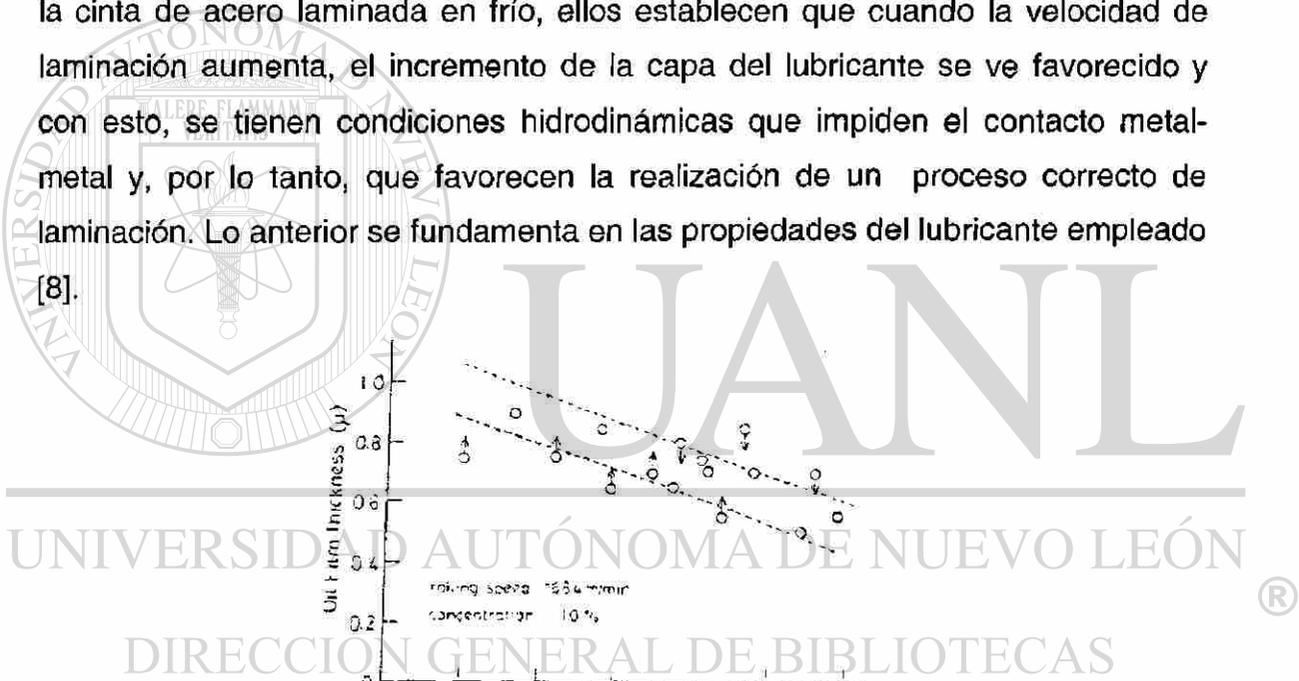


Fig.3.17. Comportamientos estudiados por Sakai, Saito y Kato [8].

Referencias Bibliográficas

[1] Tribology in manufacturing process ASME/STLE ,Hawai 1994.

[2] Bhushan, B. ,Gupta, B., "Handbook of Tribology", Mc Graw Hill, EUA 1976.

[3] Hutchings, I.M. , "Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials", Edward Arnold, Londres Reino Unido U.K.1992.

[4]Shu., Saka., "Fundamentals of Tribology" ,MIT Press, Massachusetts, EUA, Junio 1976.

[5] Bowden, F.P. ,Tabor, D. "The Friction and Lubrication of Solids" Oxford University Press, Gran Bretaña, 1954.

[6] Ginzburg, V.,Ballas,R,"Fundamentals of Flat Rolling", Manufacturing Engineering and Materials Processing, Marcel Dekeer 2000, Nva York.

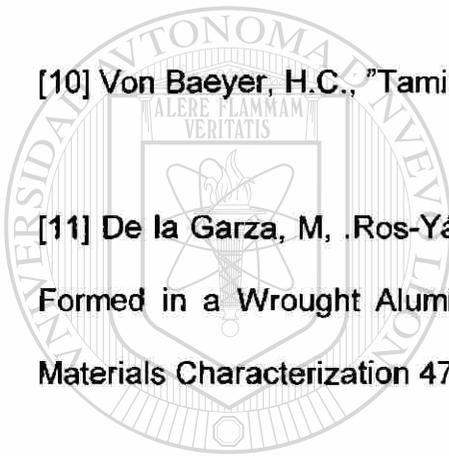
[7] Azushima, A., Kihara,J., Miyagawa,M., "Determination of Lubrication Mechanism by means of Surface Qualification of Cold Rolled Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

[8] Sakai, T., Saito, Y., Kato, K., "Estimation of Lubrication State by Observation of Rolled Strip Surface in High Speed Cold Rolling Of Mild Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

[9] Askeland ,D."Ciencia e Ingeniería de Materiales",Internacional Thompson Editores, México 1986.

[10] Von Baeyer, H.C., "Taming the Atom", Clays LTD ,EUA 1992.

[11] De la Garza, M, .Ros-Yáñez,T. Colás, R., Houbaert, Y. "Study of precipitates Formed in a Wrought Aluminum Alloy by Means of Atomic Force Microscopy", Materials Characterization 47 (2001) 397-400, Belgica, Octubre 2001.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Trabajo de campo

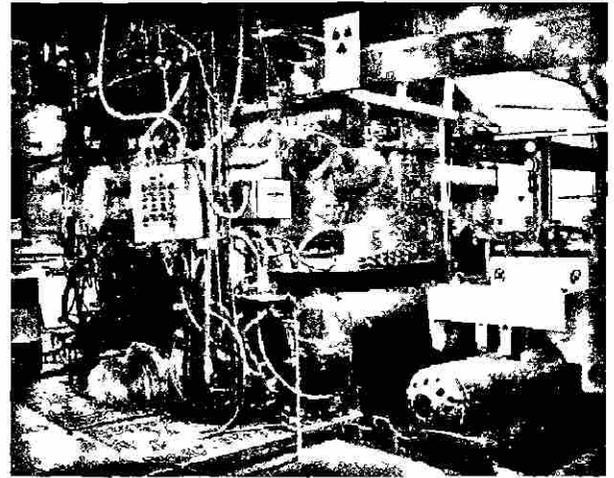
La fase inicial de la experimentación consistió en el muestreo en planta de 5 tipos de aceros que fueron previamente laminados en caliente y que serían laminados en frío. Estos aceros son los que se producen en mayor cantidad y con más frecuencia, la clasificación de los aceros se presenta en la Tabla 4.1, las muestras se obtuvieron de dos rollos que, al final del proceso de laminación, cuentan con la historia de los pasos de trabajo realizado para llegar al espesor requerido, estos rollos no serían procesados posteriormente. Uno de los rollos se obtiene directamente al final del proceso de laminación en frío y el otro fue necesario obtenerlo al final del proceso de lavado electrolítico. Se tenía conocimiento de que los aceros serían procesados por los molinos denominados MF1, MF3 y MF4 (Fig.4.1).

Tabla 4.1. Aceros muestreados y su composición química nominal.

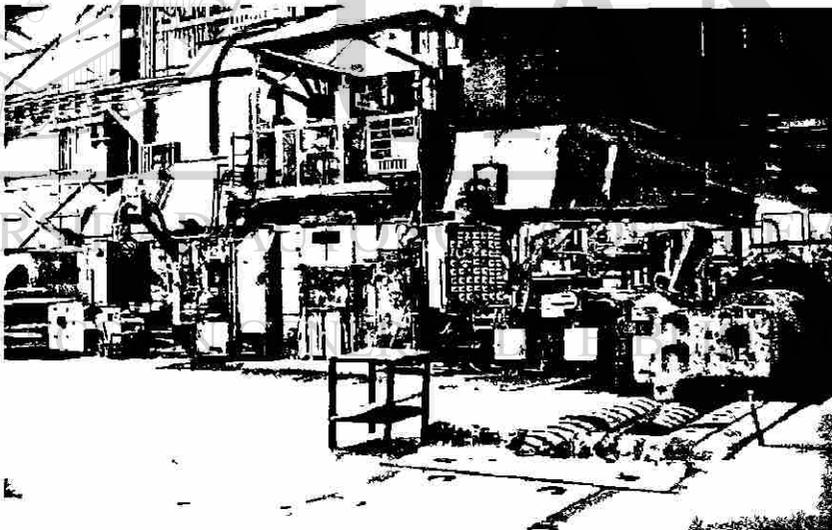
AISI SAE	C(%peso)			Mn(%peso)			Si(%peso)			P(%peso)	S(%peso)
	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Max	Max
1005	-	-	0.06	-	-	.10/0.20	-	0.044	0.03	0.015	0.012
1008	-	-	0.040/0.080	-	-	0.20/0.35	-	-	0.01	0.025	0.02
1110	-	-	0.06	-	-	0.50/0.70	0.5	0.6	0.55	0.03	0.012
1006	-	-	0.06	0.15	0.3	0.225	-	-	0.03	0.015	0.012
1011	0.05	0.09	0.07	0.75	0.9	0.825	-	-	0.03	0.015	0.012



a)



b)



c)

Fig.4.1 Molinos de Laminación a)MF1, b)MF3,c)MF4 (Cortesía HYLSA).

4.1.2 Características operacionales de fabricación de los molinos

Los parámetros operacionales de los molinos de laminación se describen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características de operación a) MF1, b) MF3, c) MF4.

MOLINO FRIO 1	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	457
Tensión máxima (Ton)	10
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	356-394

a)

MOLINO FRIO 3	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	914.4
Tensión máxima (Ton)	10
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	356-406

b)

MOLINO FRIO 4	Datos
Velocidad de línea máxima (m/min)	762
Tensión máxima (Ton)	33
Tensión máxima de enrolladores (Ton)	33
Diámetro de rodillos (mm)	75-107

c)

4.1.3 Corte de las muestras

Cuando se tuvieron los rollos con la historia de los pases, se procedió al corte de los mismos con la finalidad de obtener hojas de acero, que después serían troqueladas para obtener probetas para desarrollar ensayos de tensión en las direcciones longitudinal, transversal y a 45° (Fig.4.2) con respecto a la dirección de laminación, la dirección longitudinal en este trabajo, cabe mencionar que este estudio es una parte de las investigaciones necesarias para desarrollar un simulador del proceso de laminación en frío utilizando elementos finitos en el cual las pruebas mecánicas son necesarias para obtener datos, es por eso que son mencionadas, más los resultados de esas pruebas se utilizan sólo como comparación.

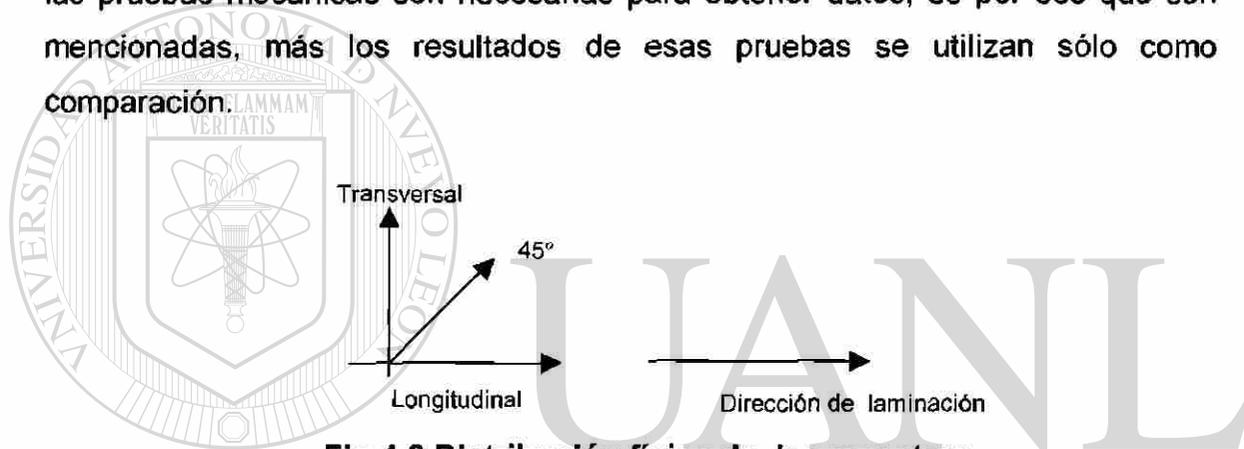


Fig.4.2 Distribución física de las muestras.

4.1.4 Obtención de los parámetros de operación durante el proceso de laminación

Los parámetros como, fuerzas de laminación, tensión en los enrolladores, velocidades de laminación, etc., se obtuvieron directamente de la base de datos de los molinos, tomando como referencia el número de secuencia del rollo muestreado.

4.2 Caracterización microestructural

Con la finalidad de conocer la características microestructurales de los aceros muestreados, se procedió a emplear técnicas de metalografía ordinaria y

metalografía cuantitativa, habiendo seleccionado los pasos de laminación a analizar incluyendo el paso denominado banda, que hace referencia al material antes de entrar al molino frío de cada uno de los aceros así como también se incluyen el primero y último de los pasos y que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Selección de muestras a analizar.

Acero	Pasos de laminación a analizar
1005	Banda, 1,2,3,4
1008	Banda, 1,4,6
1011	Banda, 1,2,4,8
1006	Banda, 1,3,6
1110	Banda, 1,2,4

4.2.1 Análisis químico

La composición real de los aceros muestreados se presenta en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Composición química real de los aceros muestreados.

AISI/SAE	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Nb
1005	0.063	0.162	0.006	0.004	0.022	0.00
1008	0.052	0.25	0.009	0.008	0.014	0.00
1006	0.063	0.171	0.011	0.001	0.015	0.00
1110	0.052	0.556	0.01	0.007	0.606	0.00
1011	0.066	0.821	0.007	0.0060	0.002	0.03

Para determinar la composición química real de los aceros muestreados se utilizó la técnica de espectroscopia de infrarrojo.

4.2.2 Análisis metalográfico

Una vez que se tuvieron las probetas de los pasos de laminación a analizar, se cortaron y montaron en resina epóxica, acomodados en orden descendente tomando como base el espesor, Fig.4.3. Las muestras fueron pulidas con papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) y agua como lubricante, siguiendo la secuencia: 120,220,320,400,600.

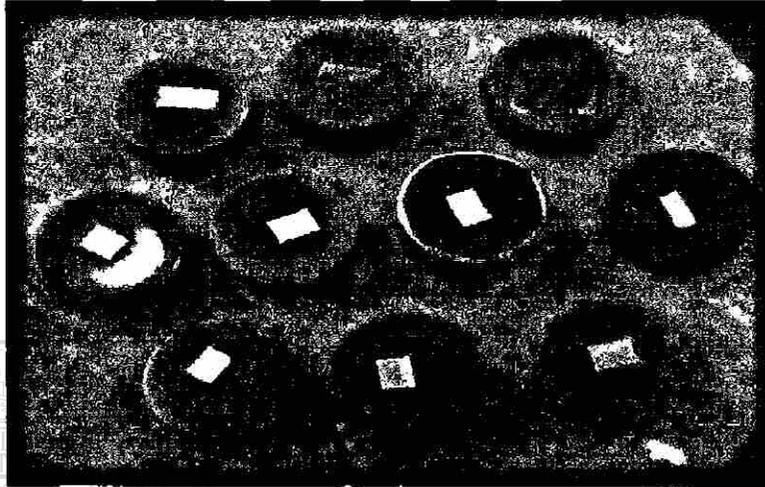


Fig.4.3 Muestras preparadas para análisis metalográfico.

Después del desbaste grueso se procedió a realizar un pulido con un disco y pasta de diamante, empleando como lubricante aceite de pulido ligero. Para el pulido final para obtener un acabado espejo se empleó un paño suave y polvo de alúmina (Al_2O_3) de tamaño de partícula de $1\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$. Una vez concluido el proceso de pulido, con el fin de revelar la microestructura del material se preparó el reactivo Nital al 3% con el fin de atacar químicamente las muestras, el cual consiste en una solución compuesta por un 97% de alcohol etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-OH}$) y 3% ácido nítrico (HNO_3). Las muestras fueron atacadas durante un tiempo de 20 segundos. Después del ataque químico las muestras fueron analizadas en un microscopio óptico marca Olympus® a diferentes aumentos. Las fotografías fueron tomadas mediante el programa de análisis de imágenes llamado Image ProPlus®.

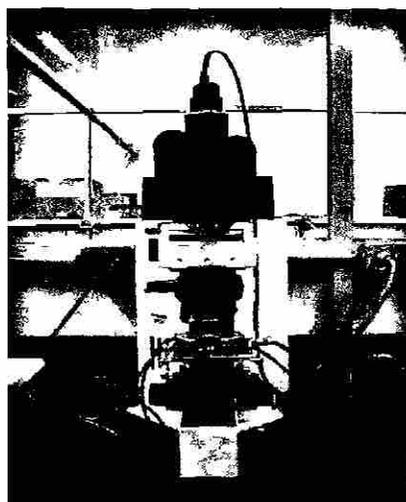


Fig.4.4 Microscopio óptico empleado para el análisis.

4.2.3 Determinación del tamaño de grano

En la determinación del tamaño de grano de los aceros muestreados, se emplearon dos métodos uno de ellos es el método Heyn [4] de medición de tamaño grano y el segundo es el método de las dos direcciones ortogonales[3].

El primero de los métodos mencionados consistió en tomar una fotografía de la microestructura de la banda de los aceros a cierto aumento y trazar sobre ella tres círculos concéntricos de tal manera que se cuente con una circunferencia equivalente (la suma de las circunferencias de los tres círculos). Para este trabajo se utilizó una circunferencia total de 250 mm. El método consiste en contar las fronteras de grano que cada uno de los círculos corta y mediante el empleo de las ecuaciones 4.2.3.1 y 4.2.3.2 el tamaño de grano en milímetros es calculado.

$$Nl = \frac{N}{\frac{Lt}{M}} = mm^{-1} \quad (4.2.3.1)$$

$$L = \frac{1}{Nl} = mm \quad (4.2.3.2)$$

Nl = número de intersecciones por unidad de longitud.

N = número de fronteras de grano contadas.

Lt = aumentos de la medición.

M = longitud de la circunferencia.

L = tamaño de grano (mm)

Se analizaron 3 campos por fotografía para este método

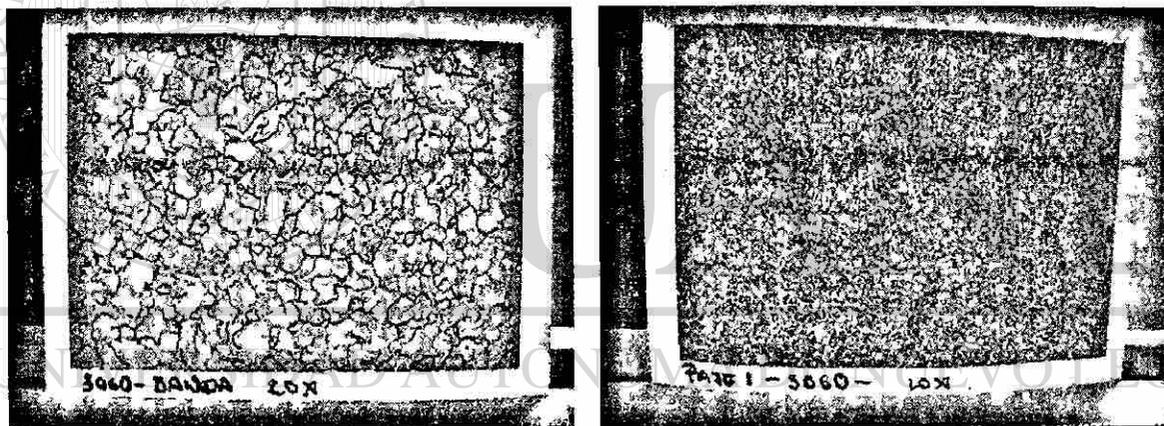


Fig.4.5 Imágenes utilizadas para el conteo de granos por el método Hey [4].

El segundo de los métodos que se utilizó se emplea para determinar el tamaño de grano promedio[3] y consiste en que con la ayuda de un programa de análisis de imágenes los granos de la microestructura son medidos en longitud en base a dos líneas ortogonales (l y t) que pasan por el , Fig. 4.6.

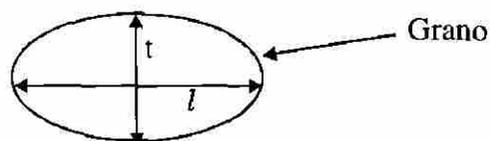


Fig.4.6 Medición efectuada en un grano

El tamaño de grano promedio se calcula a partir de la ecuación 4.2.3.3 como:

$$d = (l \cdot t)^{1/2} \quad (4.2.3.3)$$

Como un dato adicional mediante el empleo de los parámetros l y t , es posible encontrar en valor de deformación local ϵ que se describe mediante la ecuación 4.2.3.4 como :

$$\epsilon = \left(\frac{t}{l}\right)^{2/3} - 1 \quad (4.2.3.4)$$

Con el empleo de este método se analizaron 60 granos por muestra.

4.3 Ensayo de microdureza Vickers

Las muestras preparadas para los análisis metalográficos y de tamaño de grano fueron nuevamente pulidas con alúmina de $1.0\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$ en un paño suave y se atacaron nuevamente con nital al 3% con la finalidad de revelar la microestructura y realizar el ensayo de microdureza Vickers en cada uno de los pasos de laminación seleccionados con el fin de evaluar el cambio de este parámetro (VHN) conforme el proceso de laminación se lleva a cabo. El ensayo de microdureza Vickers se realizó en un microdurómetro marca Shimadzu® (Fig. 4.7), y consistió en realizar 5 indentaciones aplicando una carga de 50 gr durante un tiempo de 15 segundos teniendo la precaución de que el espaciamiento entre las huellas fuera de aproximadamente 5 veces el tamaño de la huella (Fig.4.8). El número de microdureza Vickers se obtuvo directamente con el promedio de las diagonales de la huella mediante el empleo de la ecuación para el valor de carga correspondiente. Ecuación 4.3.1.1.

$$VHN = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (4.3.1.1)$$

VHN = Número de dureza vickers.

P = Carga en gr.

d = Promedio de las diagonales en μm .

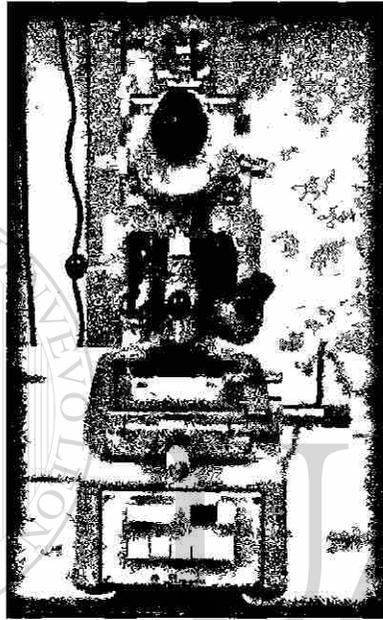


Fig.4.7 Microdurómetro marca Shimadzu.



Fig.4.8 Identación realizada en los ensayos de microdureza.

4.4 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de microscopía de fuerza atómica

Con la finalidad de obtener los parámetros de rugosidad discutidos en el Capítulo 3 de las muestras analizadas, se procedió a utilizar un microscopio de fuerza atómica Parker Scientific Instruments (Fig.4.9), debido a que este instrumento ofrece una alta definición, se realizaron barridos para cada uno de los pases de los aceros.



Fig.4.9 Microscopio de fuerza atómica (MFA).

Las muestras fueron seleccionadas de tal manera que no se apreciaran rayas producto del manejo al momento de su recolección en planta y fueron cortadas en cupones de un tamaño de 0.5 cm por 0.5 cm. Antes de ser analizadas en el microscopio de fuerza atómica, se retiró el aceite que se empleó para protegerlas del contacto atmosférico mediante el uso de un desengrasante ordinario y jabón, para posteriormente sumergirlas en acetona y colocarlas en el baño de ultrasonido por un tiempo de 4 minutos, este procedimiento se realizó para cada una de las muestras, en total se analizaron 24 muestras.

Los parámetros operacionales con los que se analizaron las muestras en el MFA fueron:

- a) Fuerza de barrido: 12 nN.
- b) Modalidad de contacto.
- c) Frecuencia de oscilación: 1Hz.
- d) Área de barrido: 100 μm^2 .

El análisis de las imágenes resultantes del barrido en el MFA se realizó mediante el uso del paquete computacional Image Processing [®], los parámetros Ra y Rms que fueron el objetivo de los barridos se obtuvieron mediante al análisis a través de un perfil de alturas que tiene la muestra en el área analizada (Fig.4.10) se obtuvo el valor Ra promedio por pase analizando 16 perfiles por muestra. Fue posible además obtener una imagen topográfica tridimensional, de la superficie de estudio que muestra el estado físico del análisis realizado, pero que no puede ser empleada para fines de análisis cuantitativo.

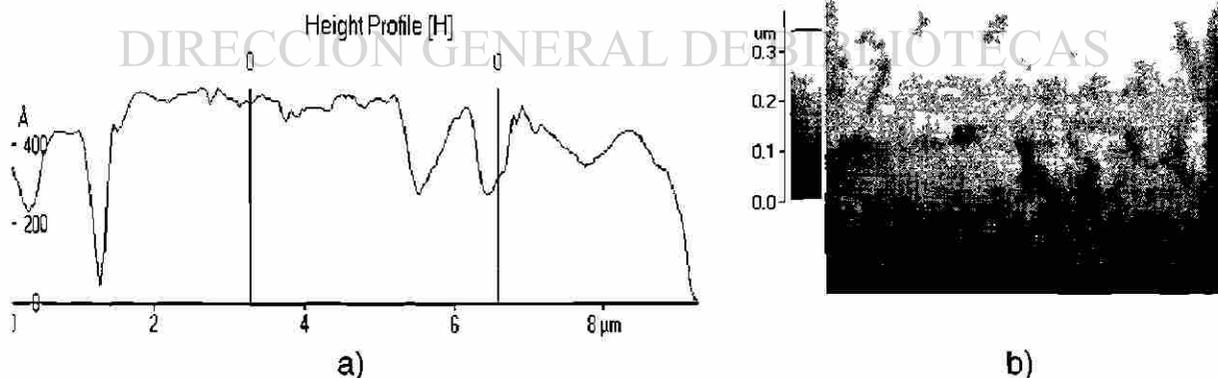


Fig.4.10 Perfil de alturas de una imagen obtenida mediante MFA. a)Perfil de alturas de una zona de la imagen en b).

4.5 Caracterización de la superficie de los aceros por medio de perfilometría óptica

Para comparar los datos obtenidos por medio del MFA, se procedió a utilizar un perfilómetro óptico marca Zygo, modelo New View 200 (Fig.4.11) en el cual, al que igual con el microscopio de fuerza atómica, se pueden obtener imágenes en tres dimensiones de las superficies de las muestras analizadas, solo que con el perfilómetro es posible barrer un área máxima de $1431 \mu\text{m}$ por $1073 \mu\text{m}$, el barrido se hacen en la modalidad de no contacto empleando el principio de interferometría de luz blanca.



Fig.4.11. Perfilómetro óptico marca Zygo.

El análisis del parámetro de rugosidad R_a , al igual que en el MFA, se efectuó sobre una imagen en dos dimensiones (Fig.4.12) la cual se analiza mediante el paquete computacional Metro Plus™, el cual, al final del análisis otorga el valor R_a

promedio de todos los perfiles de la superficie analizada (Fig.4.13). Los parámetros de barrido se presentan como sigue:

- a) Velocidad de barrido 100 $\mu\text{m}/\text{seg}$.
- b) Área del barrido 1073 μm x 1431 μm .
- c) Tiempo aproximado de barrido 50 segundos.
- d) No contacto.



Fig.4.12. Imagen bidimensional empleada para el análisis por perfilometría.

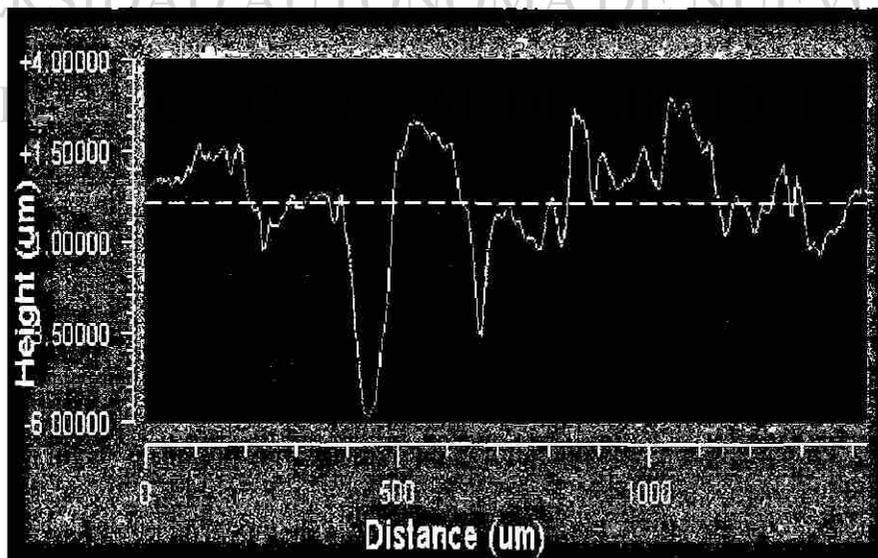


Fig.4.13 Perfil típico de alturas tomado a la mitad del área de barrido, por medio de perfilometría óptica.

4.6 Influencia del proceso de decapado sobre las superficies de los aceros

Se tomaron muestras de acero SAE 1006 con la finalidad de tratar de revisar el efecto del proceso de decapado con ácido clorhídrico (HCl) que sufren los aceros. El experimento consistió en simular las condiciones de este proceso mediante la preparación de una solución que contenía 50 ml de HCl diluidos en 100 ml de agua y que fue llevado hasta un intervalo de temperatura de entre 75 y 85°C. Las muestras fueron pulidas hasta obtener un acabado superficial espejo. Antes de exponer las muestras al medio acuoso, se obtuvo su peso y también después del tiempo de exposición de la muestra en el medio, esto con la finalidad de evaluar la pérdida en peso, Δw , debido al proceso corrosivo. Técnicas de microscopía electrónica de barrido en la región de electrones secundarios y de fuerza atómica en un tamaño de barrido (x,y) de $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ fueron empleadas para evaluar las condiciones de las muestras después del ataque. Los tiempos de exposición para las muestras pulidas fueron de 1,2 y 3 minutos mientras que la muestra con óxido en la superficie estuvo durante 3 minutos en la solución.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Referencias Bibliográficas

[1] De la Garza, M., Ros-Yáñez, Tanya., Colás, R., Houbaert, Y., "Study of precipitates formed in a wrought aluminum alloy by means of atomic force microscopy", Materials characterization 47 pp 397-400, Elsevier Science Inc. Bélgica, Enero 2002.

[2] Smith, William., "Principles of materials science and engineering", Mc Graw Hill International, EUA, 1990.

[3] Sanchez, A., Colás, R., Vélez, I., Colás, R., "Grain size and strain distributions within an automotive valve". Journal of materials processing technology 28 pp 355-344, Elsevier Science Inc. Mexico, Enero 1991.

[4] Vander Voort, George.F., "Grain size measurement" Practical applications of quantitative metallography. Mc Call Steele editors. EUA 1982.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Análisis químico

Del análisis químico realizado a las muestras se obtuvieron las composiciones químicas que se muestran en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Composición química real de los aceros muestreados.

AISI/SAE	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Nb
1005	0.063	0.162	0.006	0.004	0.022	0.00
1008	0.052	0.25	0.009	0.008	0.014	0.00
1006	0.063	0.171	0.011	0.001	0.015	0.00
1110	0.052	0.556	0.01	0.007	0.606	0.00
1011	0.066	0.821	0.007	0.0060	0.002	0.03

Como se puede apreciar, los porcentajes de carbono en los aceros muestreados se encuentran en el intervalo de 0.05 % a 0.066% lo que en este caso los hace muy similares, la diferencia está en aquellos que presentan un alto porcentaje de Silicio como en caso del acero 1110, así como también en cuanto al contenido de Mn se refiere, en donde se aprecia que el acero 1011 y el acero 1110, tienen un alto contenido. Prácticamente los tres primeros aceros son muy similares y las diferencias se encuentran sólo en las composiciones químicas de los últimos dos aceros de la Tabla 5.1.

5.2 Análisis Metalográfico

Una vez obtenida la composición química real de los aceros muestreados, haciendo uso del contenido de carbono del análisis químico y con la ayuda de un diagrama hierro-carbono se obtuvo el porcentaje de las fases presentes en los aceros y que se muestra en la Tabla 5.2, el cual se comprobó mediante los ensayos metalográficos realizados a las muestras denominadas como banda y que están representadas en las micrografías de las Figs 5.1 a la 5.3.

Tabla 5.2 Resultados de porcentajes de fases presentes en los aceros.

AISI/SAE	%C	% ferrita	% perlita
1005	0.063	94.71	5.29
1008	0.052	96.12	3.88
1006	0.063	94.71	5.29
1110	0.052	96.12	3.88
1011	0.066	94.32	5.68

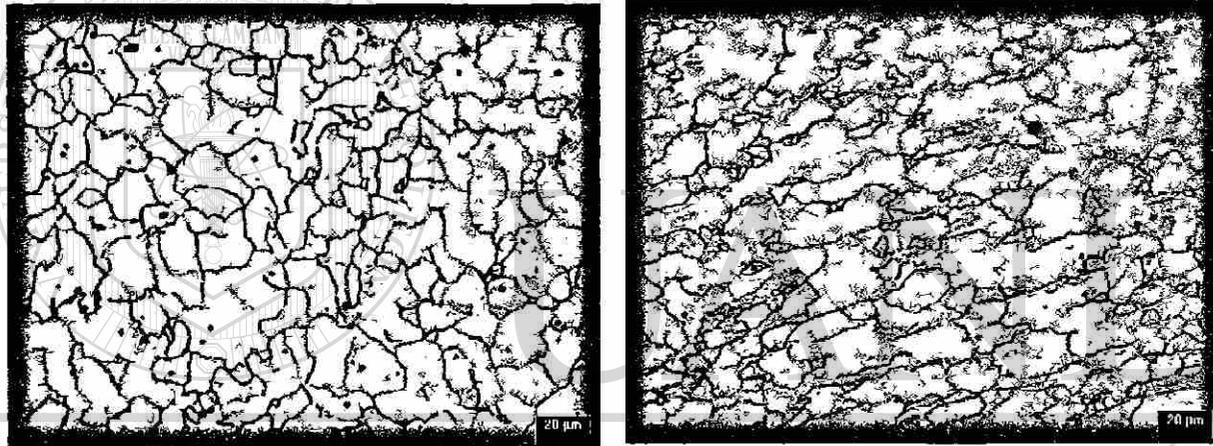
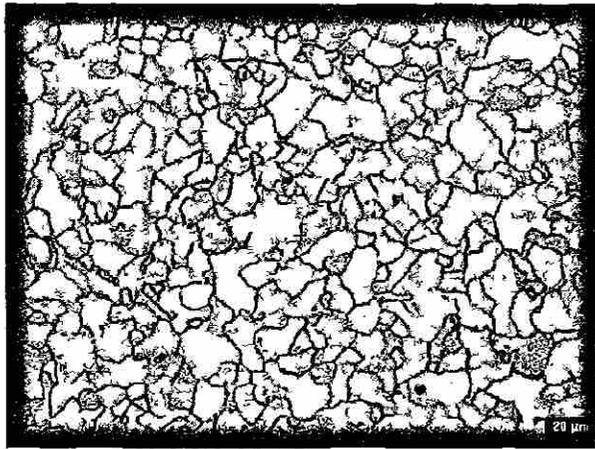
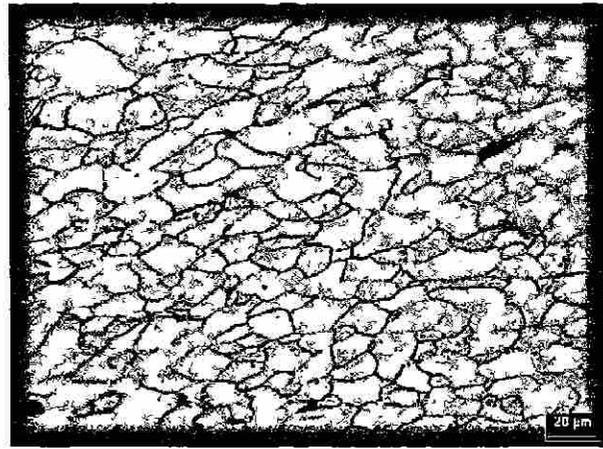


Fig.5.1 Micrografía tomada a 20X Nital 3% en las que se muestra la microestructura del acero 1008: a) proveniente de colada continua y que fue laminado en caliente. Se pueden apreciar las inclusiones no metálicas b) proveniente del laminado en caliente de un lingote normal. Se aprecia la estructura con cierto grado de deformación lo que indica que este último paso de laminado se realizó a una temperatura baja.



a)



b)

Fig.5.2 Micrografía tomada a 20X Nital 3%: a) AISI/SAE 1006 en el último paso de laminación en caliente, b) AISI/SAE 1110 en el último paso de laminación en caliente, en este acero es posible apreciar un cierto grado de deformación igual que en uno de los aceros 1008.

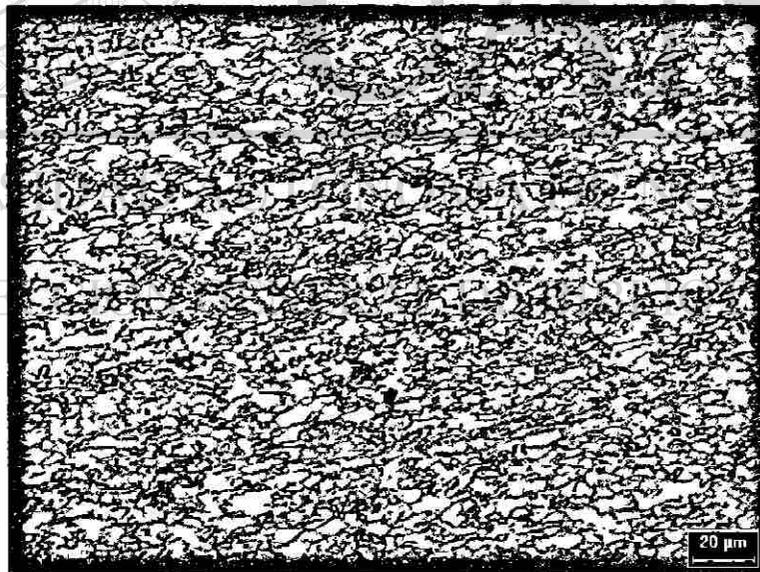


Fig.5.3 Micrografía tomada a 20X Nital 3% : microestructura de un acero AISI/SAE 1011, en donde el tamaño de grano es muy fino en comparación de los aceros analizados anteriormente y que se debe a las temperaturas de acabado en la laminación en caliente así como la adición del elemento Nb.

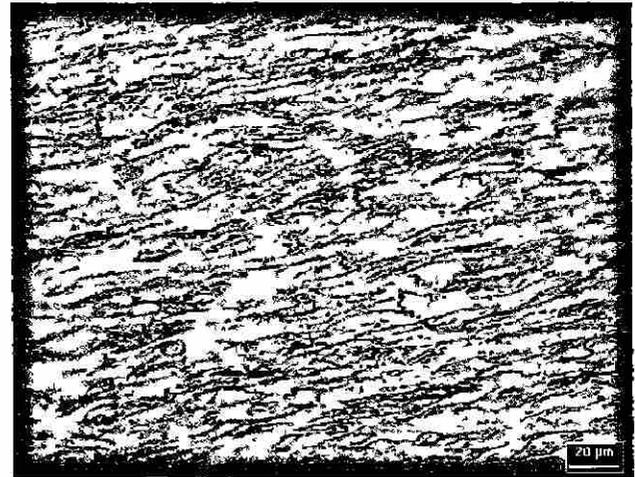
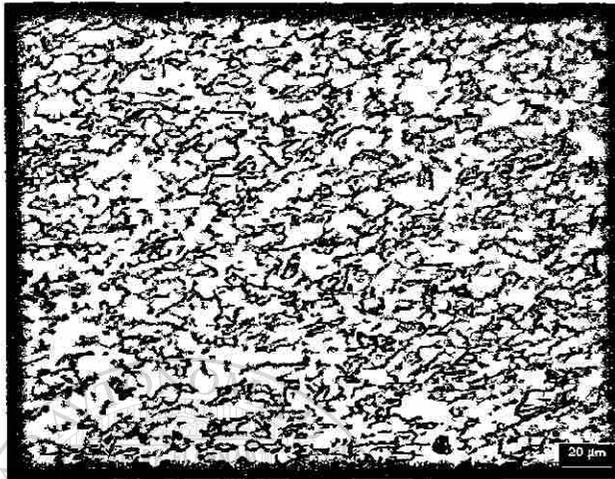
De las fotografías de las Figs. 5.1 a 5.3 ,analizadas con anterioridad, con facilidad es posible apreciar en mayor cantidad a la fase ferrita y podemos considerar que corresponde a los porcentajes teóricos calculados. En cuanto a la fase perlita en estos campos es muy difícil apreciarla debido a su poco porcentaje y a su alta dispersión en la matriz, es posible apreciarla en el acero 1110 en los límites de grano.

5.2.1 Evolución de la microestructura durante el laminado en frío

Otra de las finalidades del análisis metalográfico fue la de conocer como era el cambio en la microestructura de los aceros de estudio con respecto al porcentaje de reducción que se obtenía de la cinta de acero en cada paso de laminación, a continuación se presenta la evolución de la microestructura del acero AISI/SAE 1005.Fig. 5.4



Fig.5.4 Evolución microestructural de una acero AISI / SAE 1005, a) 0% de reducción, b)31.25 % de reducción, c) 57.50 %de reducción, d)71.25 % de reducción. 20X Nital 3%



c)

d)

Fig.5.4 Evolución microestructural de una acero AISI / SAE 1005, a) 0% de reducción, b)31.25 % de reducción, c) 57.50 %de reducción, d)71.25 % de reducción. 20X Nital 3%

5.3 Tamaño de grano

Se analizan los datos obtenidos de las mediciones efectuadas para determinar el tamaño de grano promedio de los aceros muestreados, el cual es otro de los parámetros de gran interés en este estudio. Los dos métodos descritos en la sección 4.2.3, fueron utilizados para y calcular el tamaño; los resultados se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla.5.3 Tamaño de grano promedio de los aceros.

Acero AISI/SAE	Tamaño de grano promedio método DDO	Tamaño de grano promedio método Heyn
1005	25.5	20
1008	27.6	26.9
1011	7.6	5
1006	17.4	13.2
1110	23.3	22.7

Estos datos fueron colocados en una grafica estadística de dispersión referida al 96% de confiabilidad la cual se muestra en las Fig. 5.5.

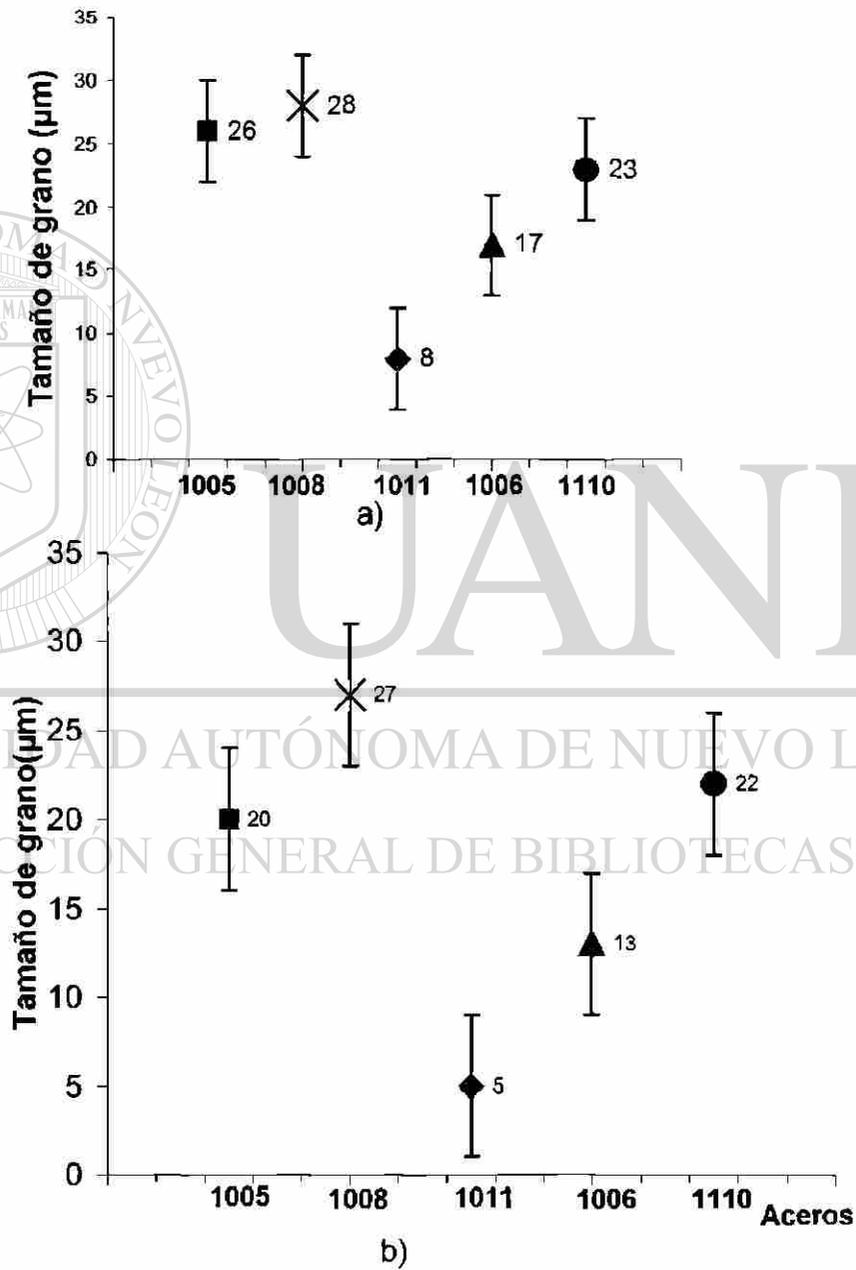


Fig.5.5 Tamaño de grano promedio de los aceros muestreados, a) Método de dos direcciones ortogonales, b) Método Heyn.

Analizando los gráficos de la Fig. 5.5 se puede observar que en los dos métodos, aparte que el tamaño de grano promedio directamente obtenido es muy cercano, el intervalo de confianza manejado para los dos métodos indica que los tamaños de grano del método Heyn [1] entran en el intervalo de los tamaños de grano del método de las direcciones ortogonales, y que así mismo el tamaño de grano comparado entre los aceros es muy similar en todos los casos, a excepción del acero 1011 el cual tiene un tamaño de grano más pequeño en comparación a los demás analizados.

Se ha manejado que para que el método Heyn sea válido se deben de analizar como mínimo 5 campos o una cantidad muy grande de granos. Se optó por tomar fotografías a bajos aumentos con la finalidad de tratar de medir tener un número mayor de granos para dos campos analizados, se encuentra que los valores comparados entre si son muy cercanos. Así mismo las mediciones efectuadas en el analizador de imágenes para evaluar el tamaño de grano mediante el método de las dos direcciones ortogonales se consideran más precisas debido a estas son independientes del error humano, ya que se puede trabajar a grandes aumentos (20X y 40X) y no requieren de medir un número tan grande de granos para un obtener un análisis confiable.

5.4 Resultados obtenidos de los ensayos de microdureza Vickers

Los resultados de los ensayos de microdureza vickers practicados a los aceros, en cada uno de los pasos de laminación se presentan a en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Datos obtenidos de los ensayos de microdureza realizados

Acero 1005->	Paso	VHN	Acero 1008->	Paso	VHN	Acero 1011->	Paso	VHN
	Banda	112.38		Banda	148.8		Banda	158.2
	pase 1	144.08		pase 1	162.48		pase 1	236.72
	pase 2	167.34		pase 4	224.4		pase 2	249
	pase 3	168		pase 6	287.25		pase 3	268.53
	pase 4	188.02					pase 4	307.28
Acero 1006->	Paso	VHN	Acero 1110->	Paso	VHN			
	Banda	147.64		Banda	143.74		pase 8	311.06
	pase 1	150.62		pase 1	165			
	pase 3	175.46		pase 2	179.7			
	pase 6	193.2		pase 4	201.02			

Para obtener una idea más precisa de lo que este número de microdureza representa, éste a su vez, fue comparado en el valor promedio de resistencia a la tensión, obtenido de los ensayos mecánicos de tensión practicados a los aceros indispensables para el desarrollo del modelo numérico de laminación en frío, los datos se comparan en la gráfica de la Fig. 5.6.

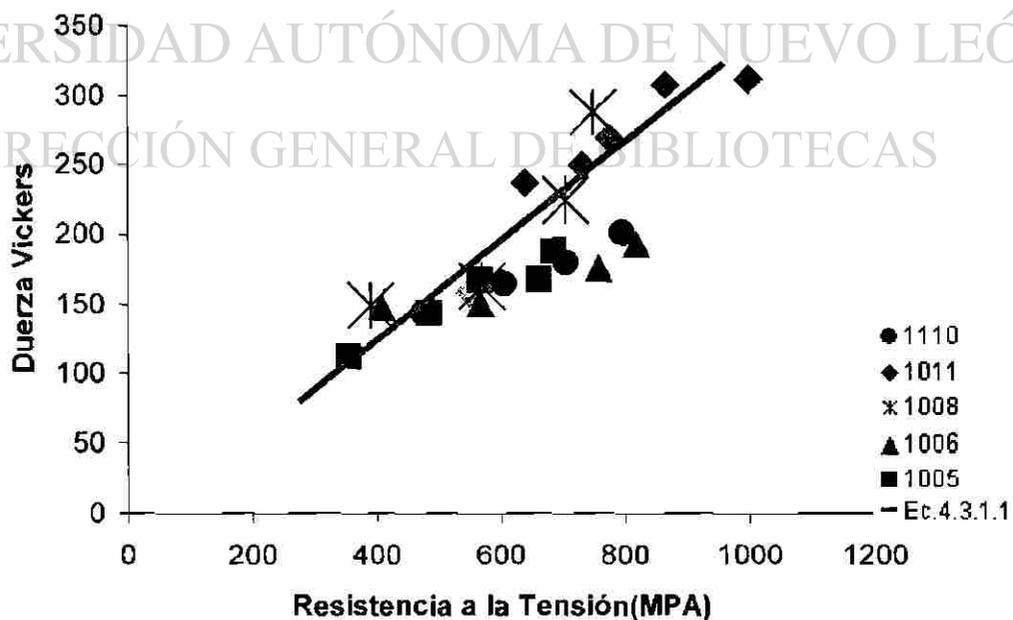


Fig.5.6 Resultados obtenidos del VHN por paso con respecto a la resistencia a la tensión.

Como puede apreciarse, si los datos de la gráfica obtenida mediante la resistencia a la tensión calculada mediante el uso de las tabulaciones existentes para un estándar [1], que relacionan el VHN con este último valor, los datos siguen una tendencia lineal, la cual si fuera graficada en conjunto con la dispersión de los datos de la ecuación 4.3.1.1 de los ensayos de microdureza Vickers, a simple vista es de hacer notar que los datos ecuación antes mencionada, caen dentro de esta dispersión de datos obtenidos a través de los ensayos mecánicos de tensión, lo que indica que las mediciones realizadas para evaluar el trabajo mecánico realizado sobre los materiales por medio del VHN, son correctas. Así mismo se puede apreciar que los aceros más resistentes resultan ser el acero 1110 y 1011 y pudiendo ser esto influenciado por el alto contenido de silicio para el primer acero y al efecto de refinamiento de grano debido al elemento químico niobio (Nb) para el segundo acero, los demás aceros no resultan ser tan resistentes como los dos antes mencionados, estos tamaños de grano pueden ser revisados en las micrografías de las Figs. 5.2 y 5.3.

5.5 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por MFA con respecto a algunas variables del proceso

Para tratar de apreciar posibles cambios en los pasos de laminación se construyeron las gráficas que muestran la evolución del valor de rugosidad (Tabla 5.5), por pase, a través del análisis de los perfiles que fueron obtenidos mediante microscopía de fuerza atómica para cada paso, con respecto a variables obtenidas del proceso, como espesor, velocidad, y fuerza de laminación, así mismo se calculó el estado del espesor de la capa de lubricante en la interfase metal-metal, estos datos pueden ser comparados con las gráficas de la sección 3.7, Figs. 3.16 y 3.17.

Tabla 5.5 Valores Ra promedio obtenidos mediante MFA.

Acero 1005	Ra (μm)	Acero 1008	Ra (μm)	Acero 1011	Ra (μm)	Acero 1006	Ra (μm)	Acero 1110	Ra (μm)
Banda	0.089	Banda	0.162	Banda	0.107	Banda	0.199	Banda	0.416
Paso 1	0.042	Paso 1	0.089	Paso 1	0.044	Paso 1	0.016	Paso 1	0.041
Paso 2	0.021	Paso 4	0.022	Paso 2	0.040	Paso 3	0.025	Paso 2	0.039
Paso 3	0.025	Paso 6	0.023	Paso 3	0.036	Paso 6	0.023	Paso 4	0.049
Paso 4	0.010			Paso 4	0.043				
				Paso 8	0.061				

Imágenes topográficas (Anexo 1) que cubren una área de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ y que muestran el estado de la superficie de los aceros laminados fueron también obtenidas con el fin de analizar el estado de la superficie debido al proceso y se presentan en la figura 5.7

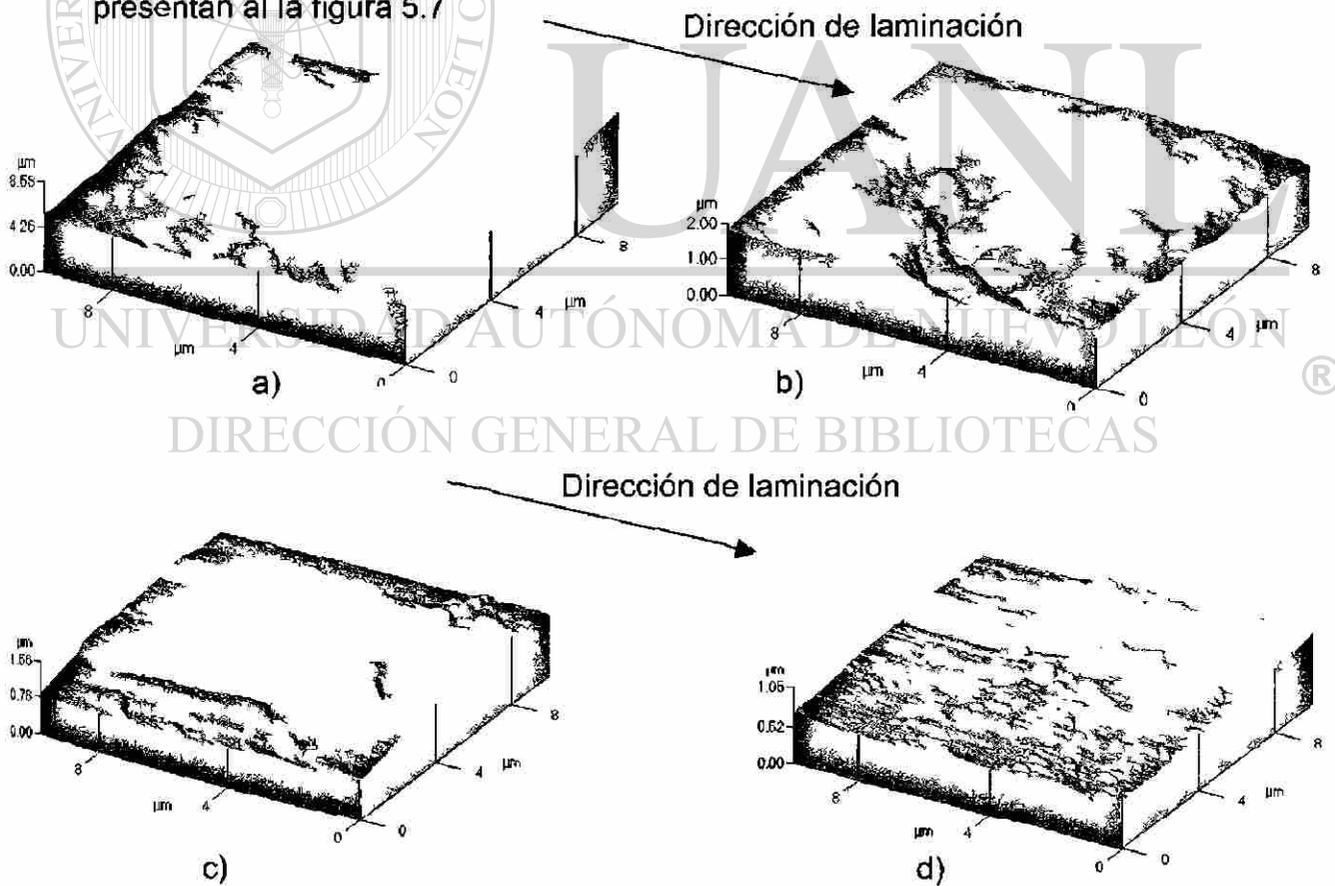


Fig.5.7. Evolución del estado superficial del acero 1008. a) Banda, b) Primer paso de laminación, 27.8 % de trabajo en frío, c) Cuarto paso de laminación 23.4% de trabajo en frío, Sexto paso de laminación, 22.3 % de trabajo en frío.

5.5.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor

Se graficó el valor de rugosidad R_a de la banda, con respecto al valor del tamaño de grano, para cada uno de los aceros, la gráfica que muestra estos comportamientos se presenta en la Fig. 5.8 y en donde se aprecia que no existe para estos aceros una relación entre el tamaño de grano promedio, por que para valores de rugosidad como $0.42 \mu\text{m}$ del acero 1110, el tamaño de grano es muy cercano al valor del acero 1008, el cual registra un valor de R_a de banda del $0.09 \mu\text{m}$.

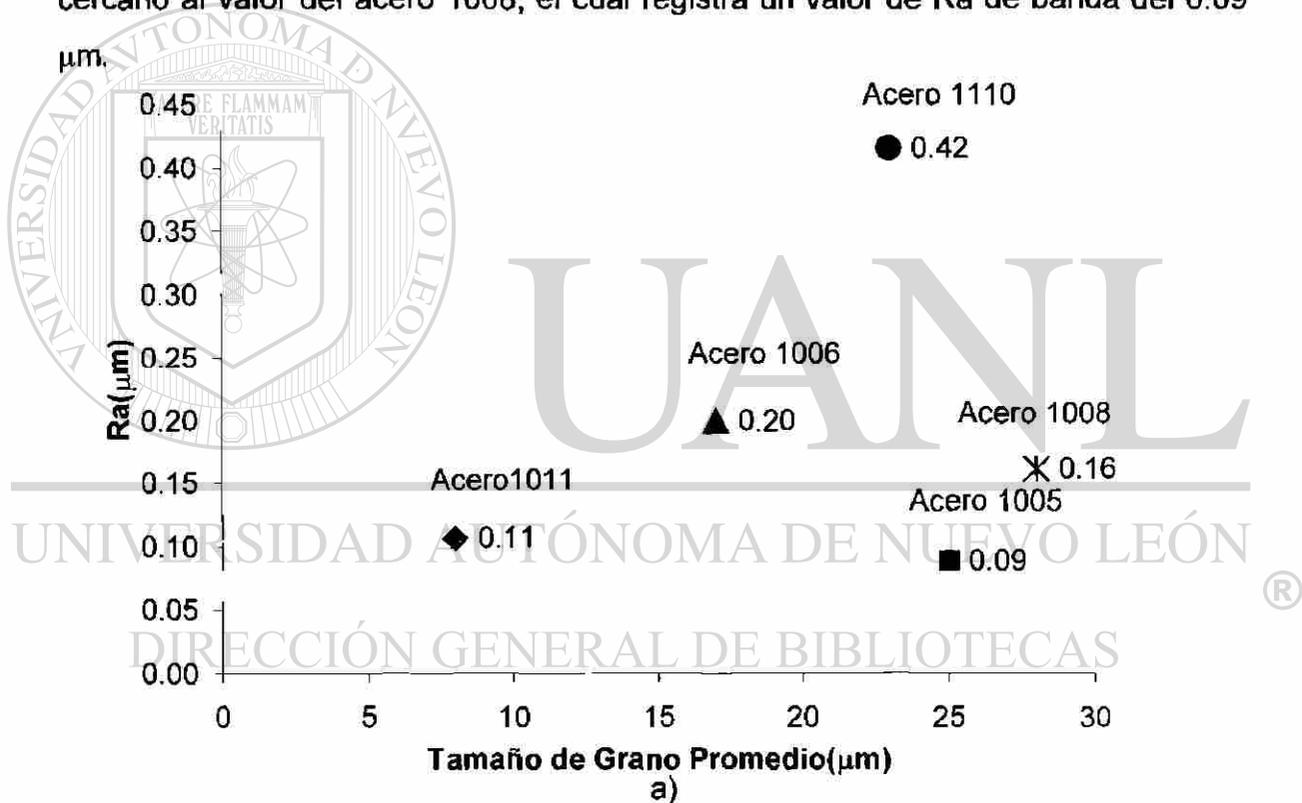


Fig.5.8 a) Rugosidad R_a de la banda con respecto al tamaño de grano.

Es posible además identificar una relación entre el contenido de silicio en los aceros y su rugosidad superficial obtenida mediante el MFA y que puede ser apreciado en la figura 5.8 b)

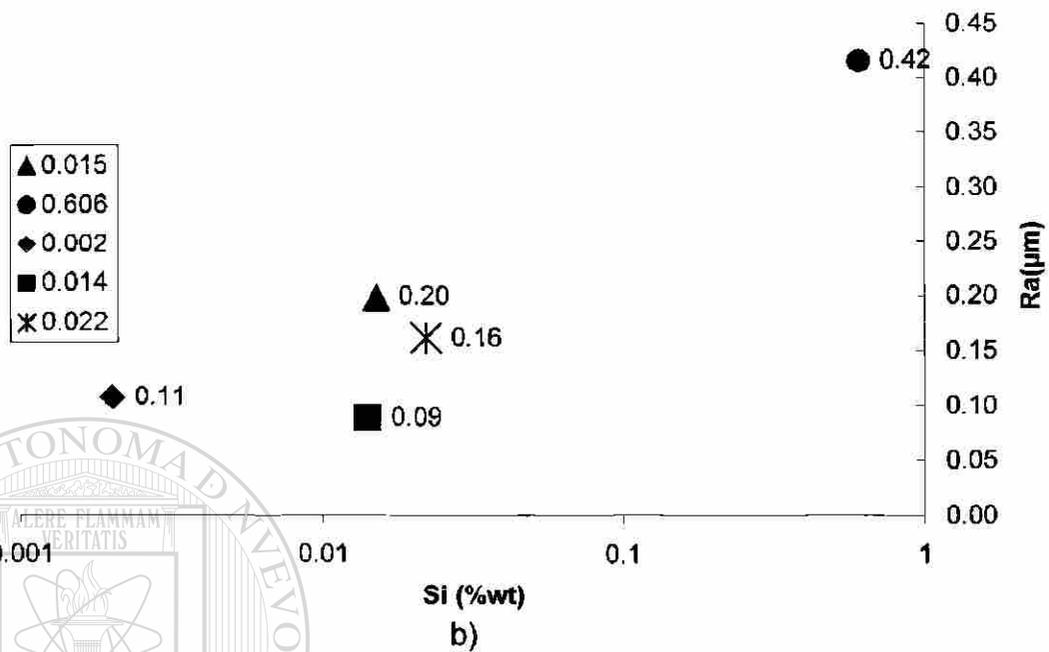


Fig.5.8 b) Rugosidad Ra de la banda con respecto al contenido de silicio

Además se graficó el valor Ra promedio por pase, con respecto al espesor del mismo, para cada uno de los aceros, la gráfica que muestra estos comportamientos se presenta en la figura 5.9

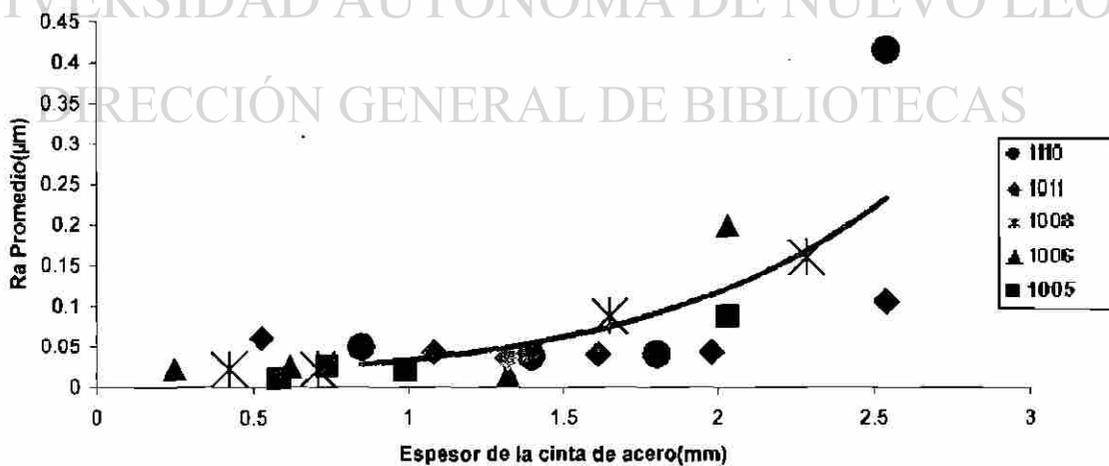


Fig.5.9 Evolución de la rugosidad con respecto a la disminución en espesor.

Para todos los aceros, es posible apreciar que existe una caída en el valor de la rugosidad del paso inicial, el cual no ha recibido trabajo mecánico, hacia el primer paso de la laminación que es donde ya se ha efectuado trabajo, se puede apreciar que los valores de rugosidad superficial tienden a ser constantes durante el desarrollo de la laminación.

5.5.2 Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerza de laminación

Debido a que la fuerza con la que se realizó el trabajo de laminación en frío de los aceros muestreados, resultó ser variable para cada paso de laminación y el intervalo de valores de rugosidad esta entre los 0.001 y 0.1 μm se presentan los datos de la evolución de la rugosidad con respecto a la fuerza de laminación en una gráfica de ordenada logarítmica y por separado para cada acero debido a la variación de las fuerzas antes mencionada (Figs. 5.10 a 5.12).

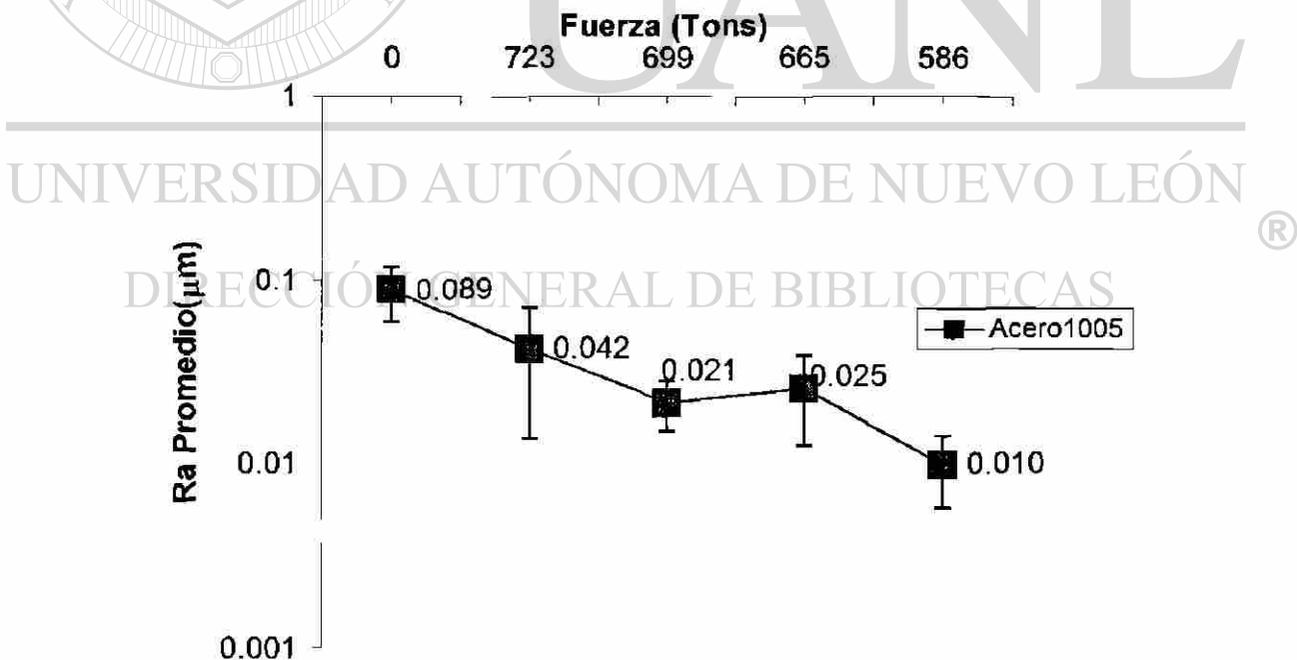
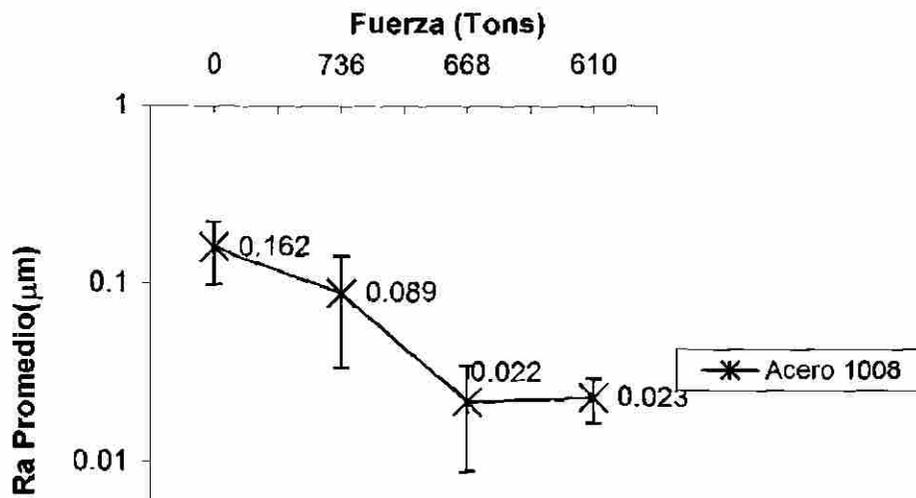
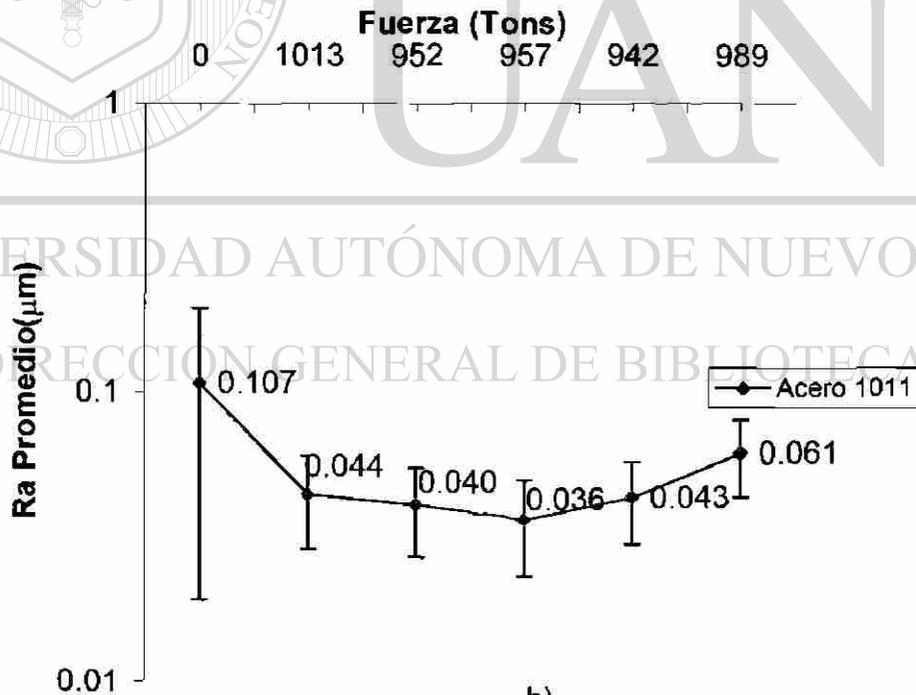


Fig.5.10. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1005.



a)



b)

Fig.5.11. Evolución de la rugosidad con respecto a las fuerzas de laminación:
a) Acero 1008, b) Acero 1011.

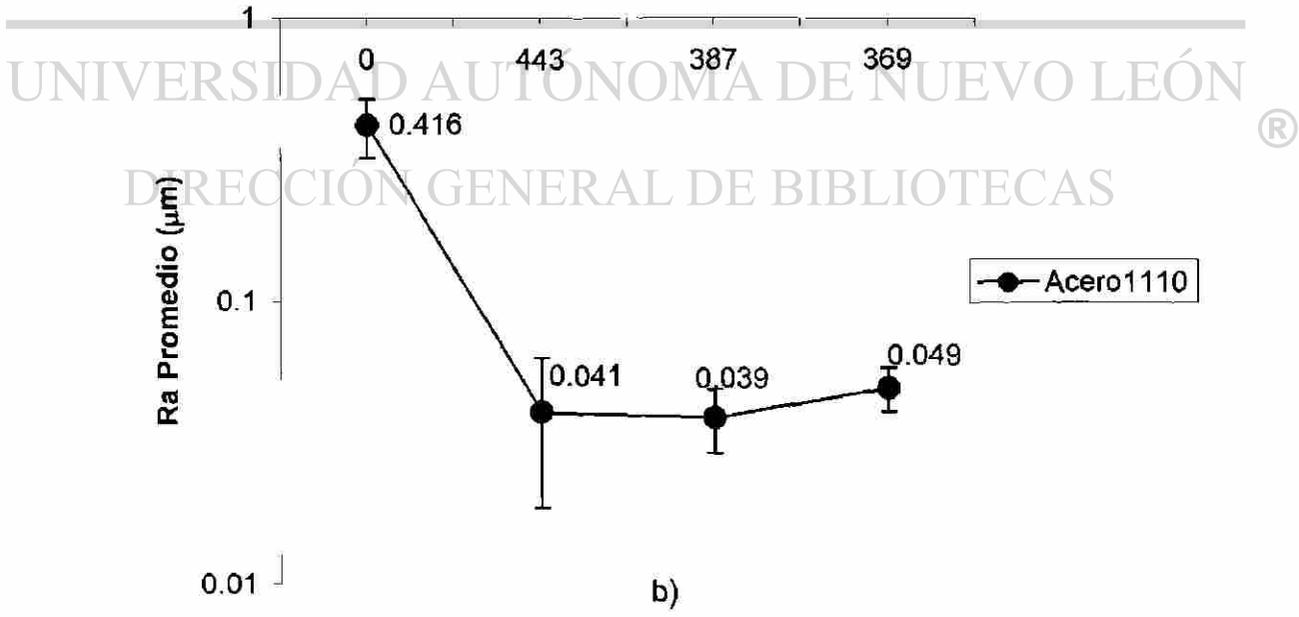
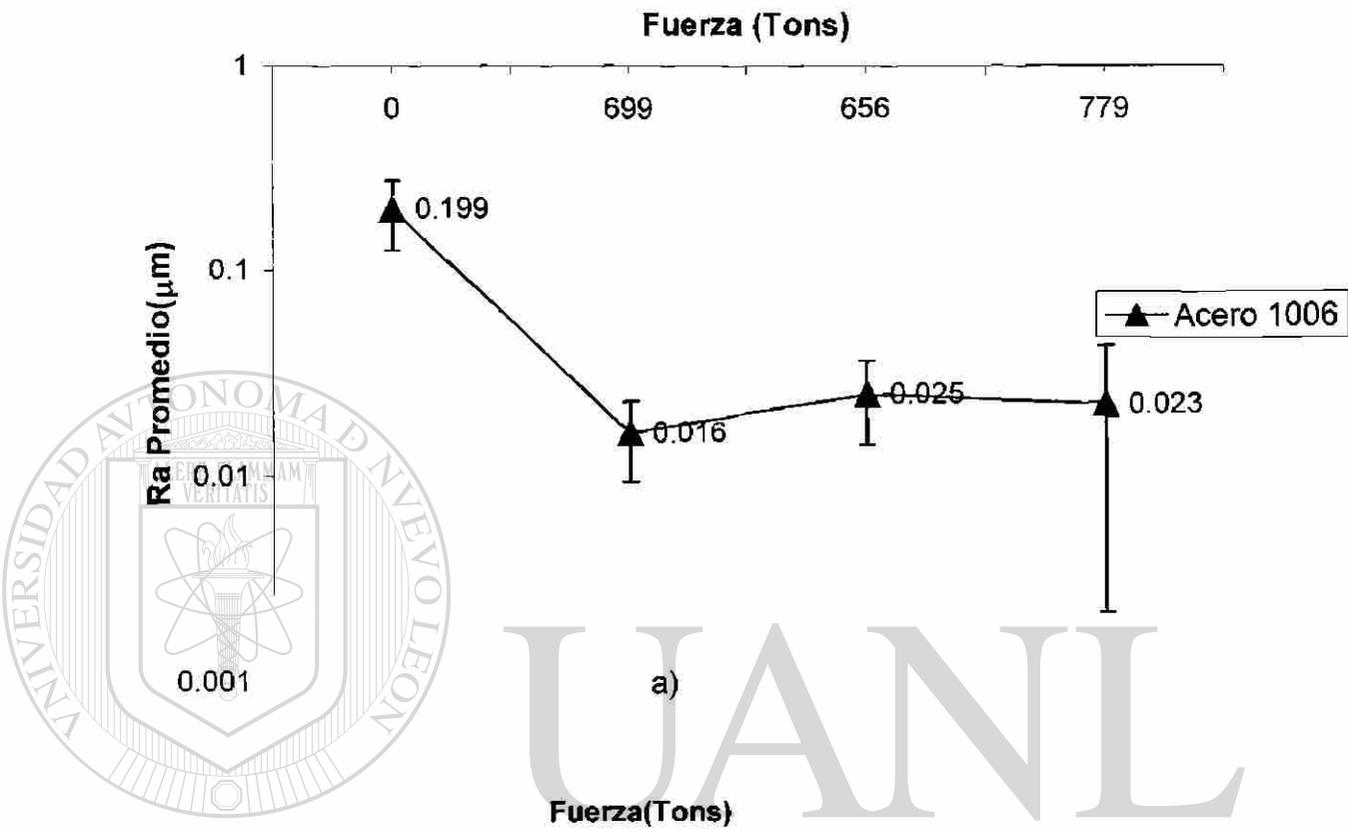


Fig.5.12. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerza de laminación. a)Acero 1006), b) Acero 1110.

Del conjunto de graficas presentadas con anterioridad se puede apreciar que prácticamente, independientemente de la fuerza aplicada, la rugosidad superficial tiende a permanecer estable para cada tipo de acero muestreado, es decir que la rugosidad superficial no se ve afectada por las variaciones en la fuerza de laminación a lo largo del proceso de laminación, aunque en algunos casos como en el acero 1011, el error en la banda se considera grande, este conservaría la misma tendencia.

5.5.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación

El efecto de la velocidad en m/min. sobre la rugosidad superficial se aprecia en la Fig 5.13.

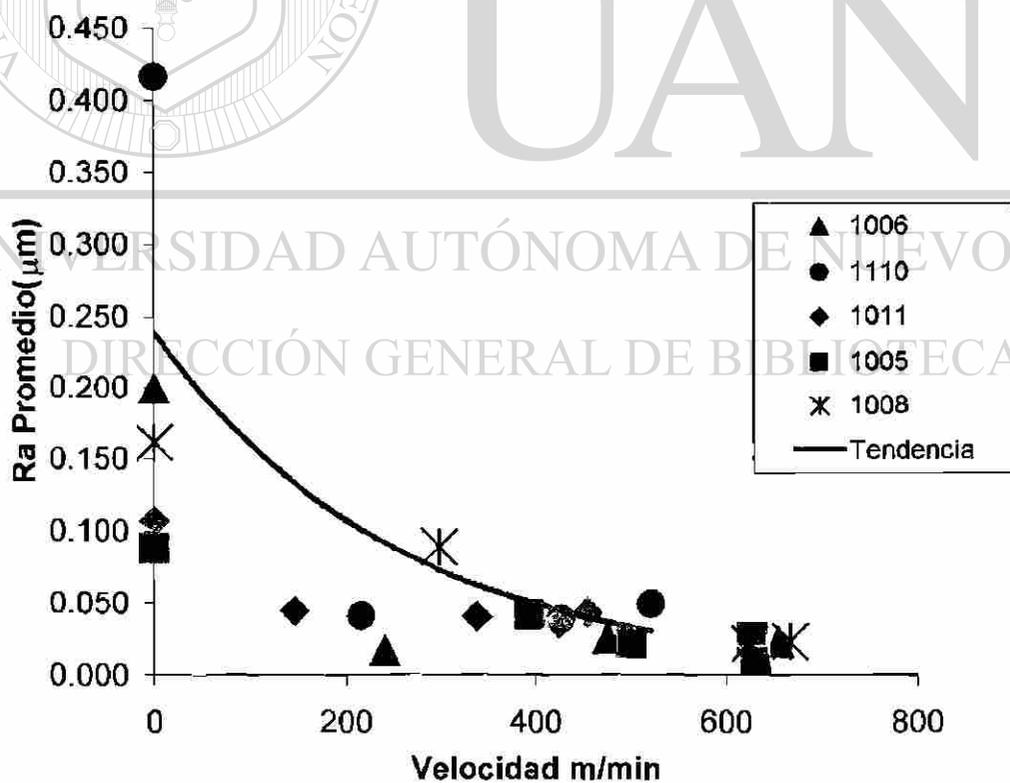


Fig.5.13 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación.

En este gráfico (Fig.5.13) se aprecia que el comportamiento que sigue la rugosidad de las superficies de los aceros laminados es el mismo comportamiento que se muestra con respecto al la reducción en espesor, que se presentó con anterioridad en la Fig. 5.9. A bajas velocidades de laminación se observa la caída de la rugosidad superficial de la cinta de acero, en este paso es de esperar que exista contacto metal-metal entre lámina y rodillos debido a que el fluido lubricante es posible que no adquiriera el espesor adecuado a consecuencia del poco movimiento relativo entre la cinta y el rodillo, lo cual se vería reflejado en un aumento en la rugosidad de la cinta de acero y que se esperaba sería transmitida por los rodillos, aún y cuando estos tengan una cantidad considerable de tiempo de operación, además se sabe que estos aceros fueron laminados a una velocidad intermedia, si estos datos son comparados con los datos obtenidos en los trabajos de Asuzhima y Sakai [3], se encontrará que la velocidad a las que ellos realizaron los experimentos son por mucho mayores, que las de este estudio, esto hace que las condiciones hidrodinámicas de lubricación no sean las adecuadas y el régimen de lubricación en el proceso sea diferente trayendo como consecuencia incrementos en los valores R_a superficiales. La evolución del espesor de la capa de lubricante que se calculó por medio de la ecuación 3.7.1.1 propuesta por Azushima [2] y la cual se presenta en el Capítulo 3, se analiza en la gráfica de la Fig. 5.14, en la cual se aprecia que conforme se efectúa trabajo para reducir el espesor de la cinta de acero, la superficie de la cinta favorece el crecimiento de dicha capa y ésta se mantiene constante a lo largo de todo el proceso de laminado, la rugosidad superficial de los rodillos de trabajo se presenta en la Tabla 5.6, además del números de rollos laminados antes del que se utilizó para la obtención de muestras. En la Fig. 5.15 puede apreciarse que la conforme se llevan a acabo los pasos de laminación, debido a la disminución en el valor R_a de la superficie de la cinta de acero, el espesor de la capa de lubricante, se reduce pudiendo afectar el acabado de la superficie si existieran contactos metal-metal.

Tabla 5.6. Análisis de superficie de los rodillos

Acero	Numero de rollos laminados antes del actual	Ra rodillos(μm)
1006	4	1.55
1110	3	1.35
1011	9	1.51
1005	14	1.63
1008	15	1.64

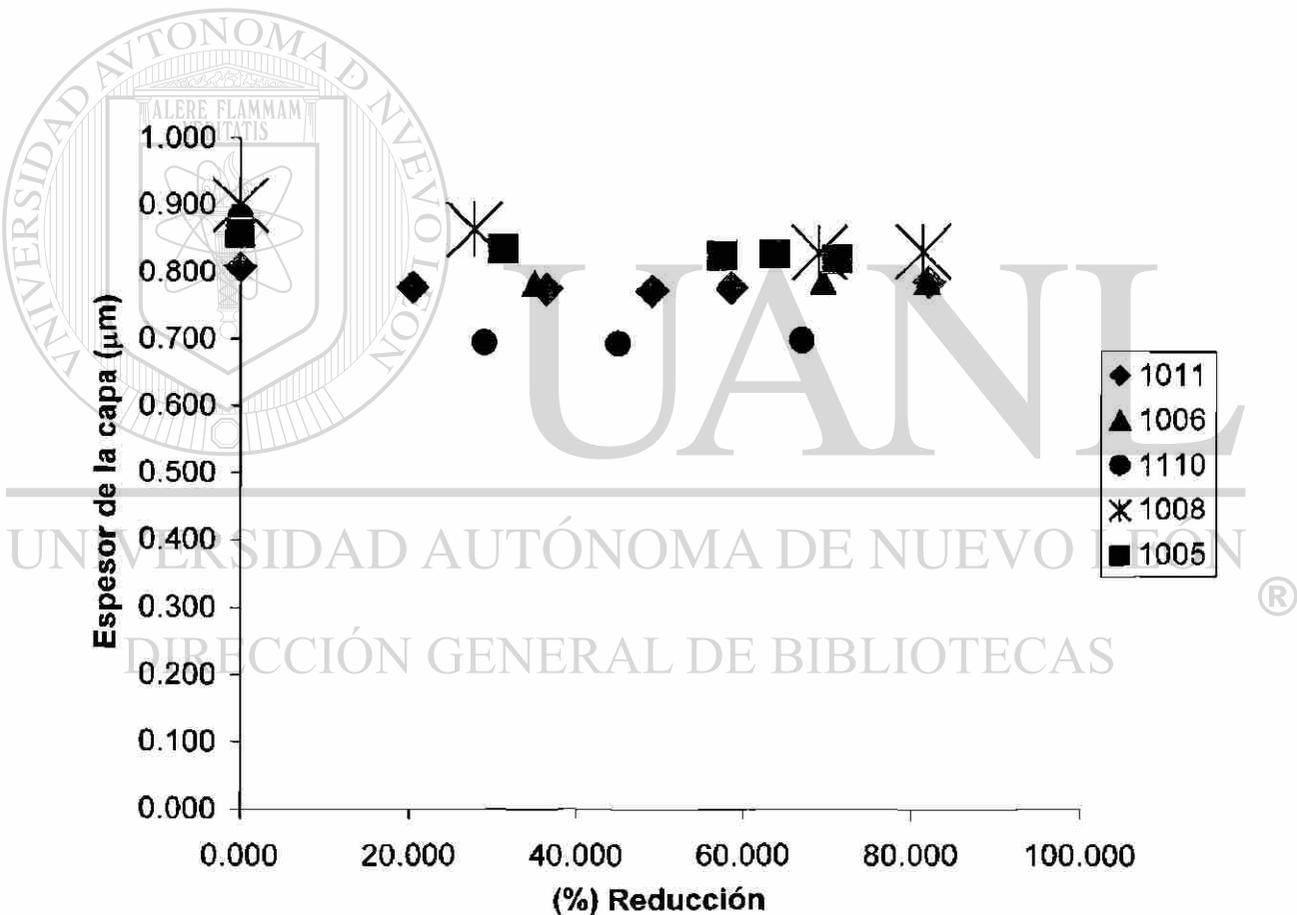


Fig.5.14 Comportamiento de la capa de lubricante con respecto al % de reducción de los aceros muestreados.

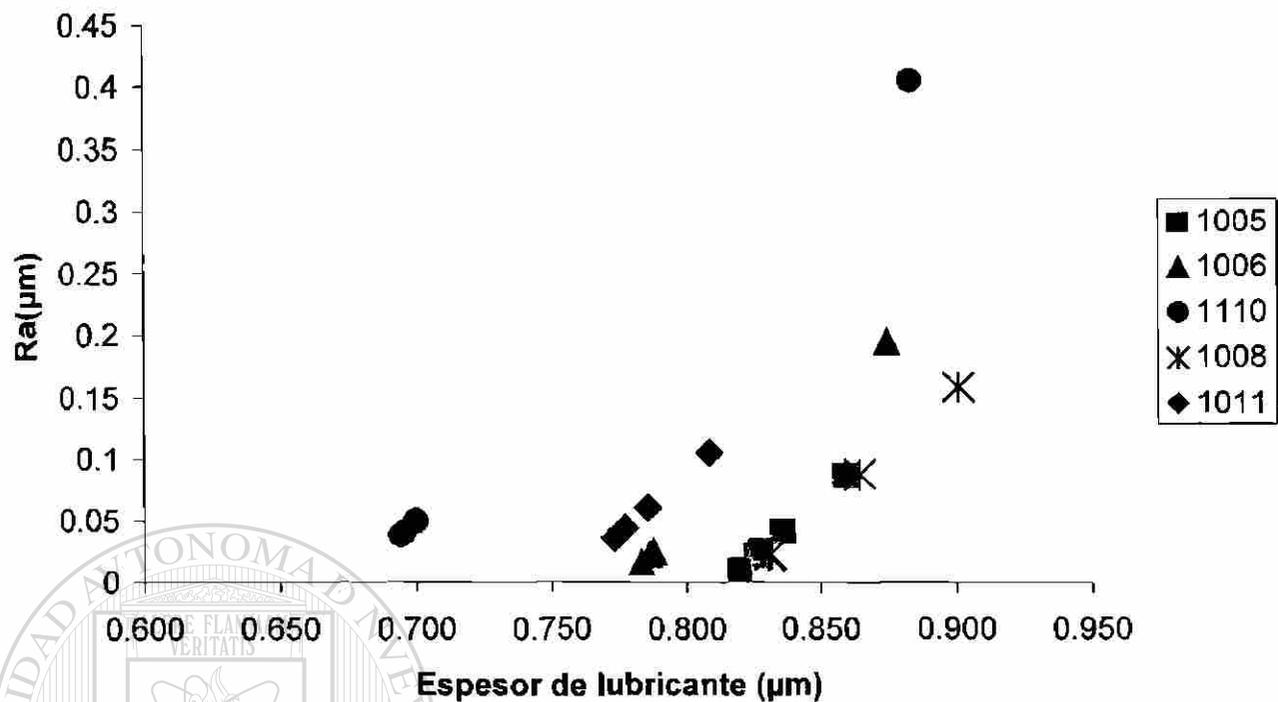


Fig.5.15. Comportamiento de la rugosidad de la superficie en función de la capa de lubricante formada durante el proceso de laminación.

Haciendo uso de todos las graficas presentadas en este Capítulo, es posible decir que la rugosidad superficial no se ve afectada por las reducciones en espesor, las fuerzas de laminación, ni las velocidades, es decir, que mientras las condiciones hidrodinámicas desarrolladas durante el proceso de laminación se mantengan, la rugosidad superficial siempre presentará el mismo comportamiento de mantenerse constante a partir del primer paso de laminación, puede ser posible que al momento de que entra el material como se recibe del proceso de decapado y con combinaciones de velocidades de laminación bajas (menos de 100 m/min.), no se tenga un correcto atrapado mecánico del lubricante y por lo tanto se tengan contactos metal-metal. Esto no fue apreciado en este estudio. Así mismo la diferencia entre los valores de fuerzas para cada paso de laminación no es muy grande, lo que favorece también que la evolución de la rugosidad superficial de la cinta de acero durante el proceso de laminación, se mantenga constante.

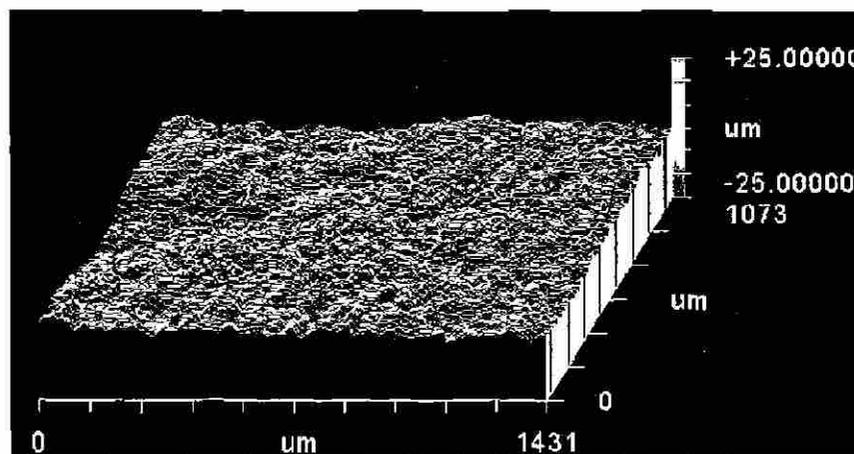
5.6 Resultados obtenidos de las relaciones entre los parámetros de rugosidad obtenidos por Perfilometría Óptica con respecto a algunas variables del proceso

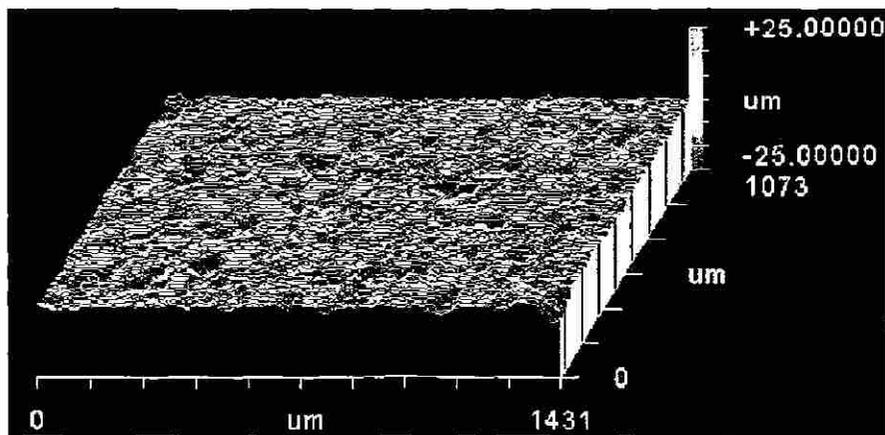
Al igual que para el caso de microscopía de fuerza atómica, el valor de rugosidad Ra que se obtuvo de cada paso de laminación se utilizó para relacionarlo con las variables del proceso de laminación, la colección de datos se presenta en la Tabla 5.7.

Tabla.5.7 Valores Ra promedio obtenidos mediante Perfilometría Óptica .

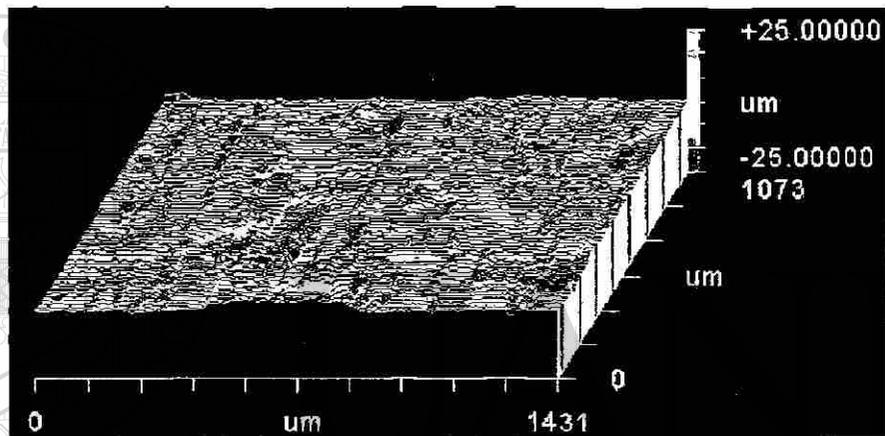
Acero 1005	Ra (µm)	Acero 1008	Ra (µm)	Acero 1011	Ra (µm)	Acero 1006	Ra (µm)	Acero 1110	Ra (µm)
Banda	2.31	Banda	1.92	Banda	2.15	Banda	2.62	Banda	2.39
Paso 1	0.91	Paso 1	0.62	Paso 1	0.64	Paso 1	0.87	Paso 1	1.68
Paso 2	0.60	Paso 4	0.71	Paso 2	0.59	Paso 3	1.14	Paso 2	1.31
Paso 3	0.73	Paso 6	0.49	Paso 3	0.61	Paso 6	0.72	Paso 4	1.07
Paso 4	0.81			Paso 4	0.63				
				Paso 8	0.64				

Las imágenes topográficas en un área de barrido de muestras del acero 1008 se presentan en la figura 5.16, en las que se aprecia la evolución de la superficie a lo largo del proceso de laminación. Las imágenes de los pasos analizados se muestran en el Anexo 3.

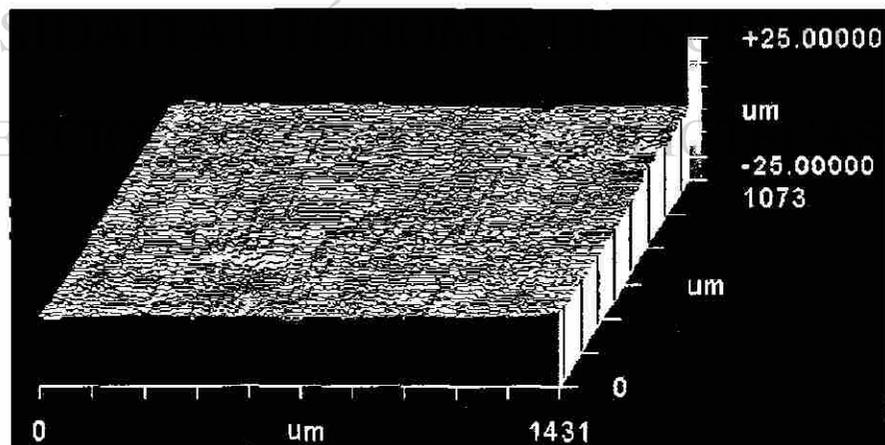




b)



c)



d)

Fig.5.16 Evolución del estado superficial del acero 1008. a) Banda, b) Primer paso de laminación, 27.8 % de trabajo en frío. c) Cuarto paso de laminación, 23.4 % de trabajo en frío. d) Sexto paso de laminación 22.3 % de trabajo en frío.

5.6.1 Evolución de la rugosidad superficial con respecto al tamaño de grano y a la reducción en espesor

La grafica de la figura 5.17 muestra la variación del valor Ra inicial de la muestra con respecto al tamaño de grano promedio.

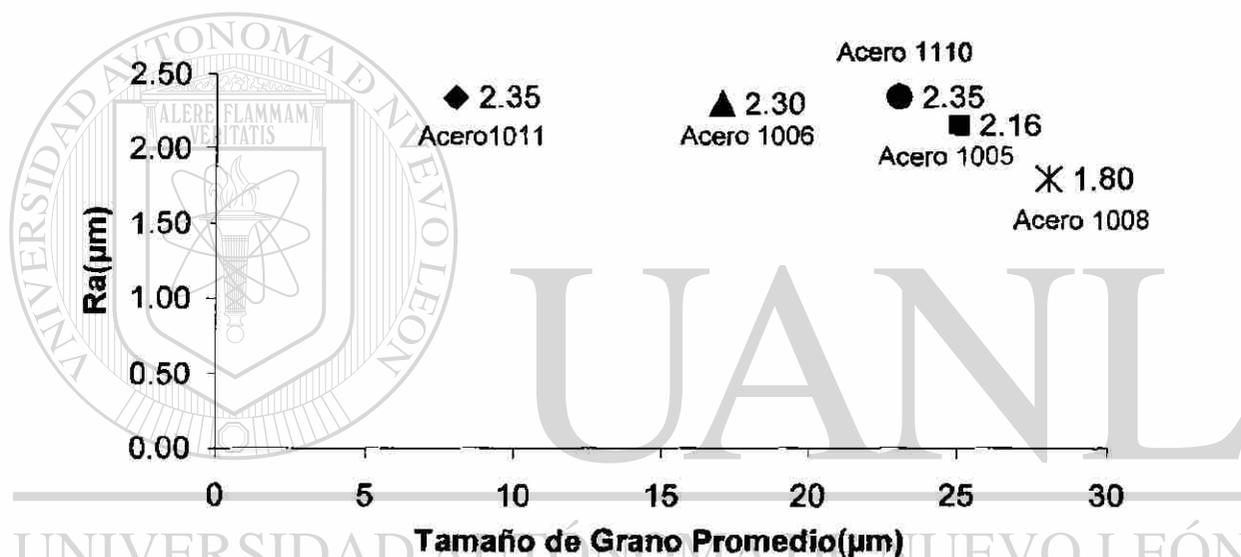


Fig.5.17 Rugosidad Ra de la banda con respecto al tamaño de grano. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Al igual que en el gráfico de la Fig.5.8 a), en este gráfico no es posible apreciar alguna relación entre el tamaño de grano y el valor Ra de rugosidad inicial de la cinta de acero (Banda).

No fue posible encontrar alguna tendencia en el gráfico de la figura 5.18 entre el valor Ra inicial y el contenido de Si de los aceros, a diferencia de la tendencia observada en el grafico de la Fig.5.8 b) en donde se aprecia que existe un relación entre los valores de rugosidad obtenidos por MFA y el contenido de Silicio.

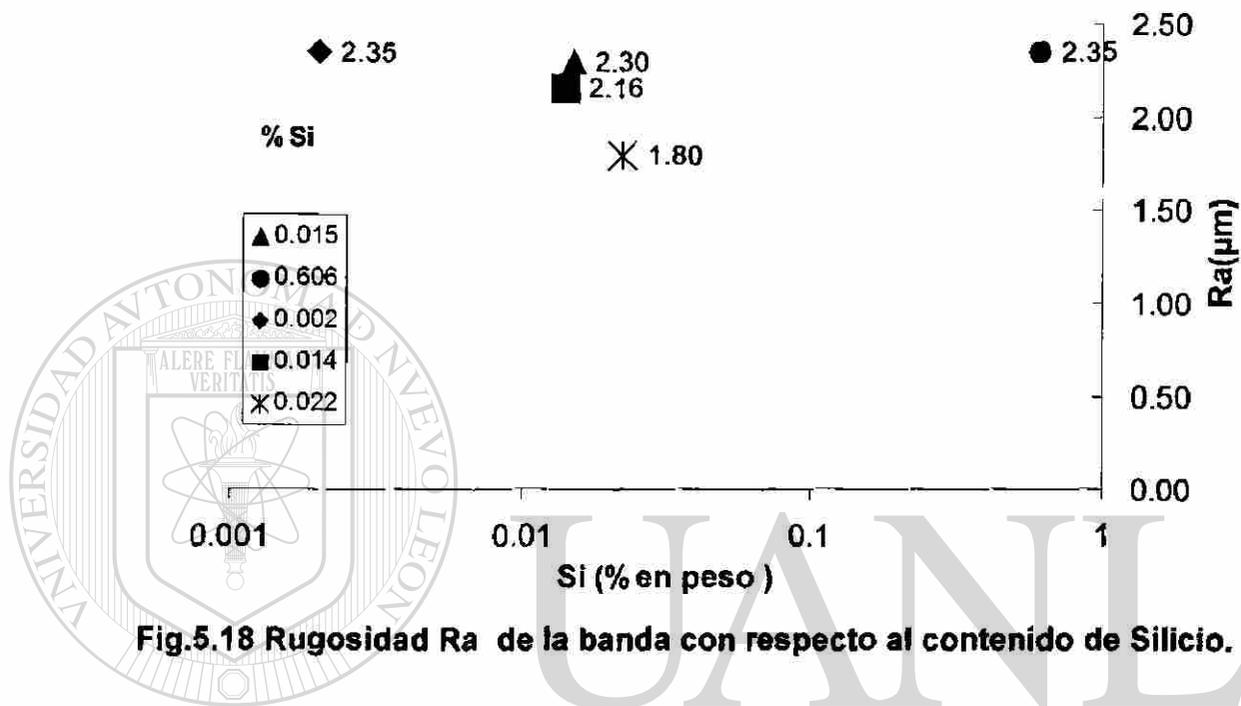


Fig.5.18 Rugosidad Ra de la banda con respecto al contenido de Silicio.

La evolución de la rugosidad superficial de la cinta de acero, conforme el espesor es reducido, se presenta en el gráfico de la Fig.5.19. Igual que en el caso de los datos obtenidos por MFA, es posible apreciar, una caída desde el paso de entrada a la laminación, hacia el primer paso y a partir de ahí, se tiene la tendencia de la rugosidad de la superficie de la cinta de acero a mantenerse constante. Sólo en el caso del acero 1110, es posible apreciar que se tiene una tendencia de disminución del valor Ra promedio, conforme el material es reducido en espesor.

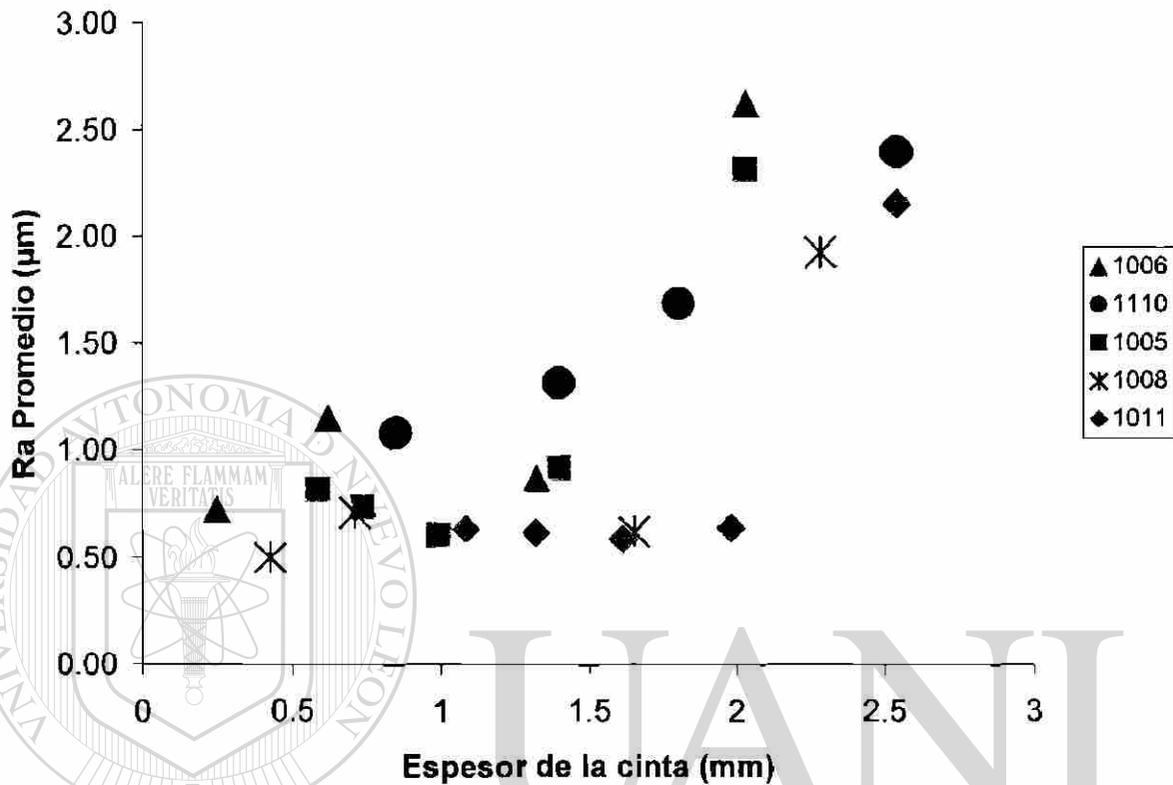


Fig.5.19 Evolución de la rugosidad con respecto a la disminución en espesor.

5.6.2 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la fuerza de laminación.

A continuación se presentan las graficas de ordenada logarítmica de los valores de rugosidad obtenidos por perfilometría óptica, con respecto a las fuerzas de laminación empleadas durante el proceso.

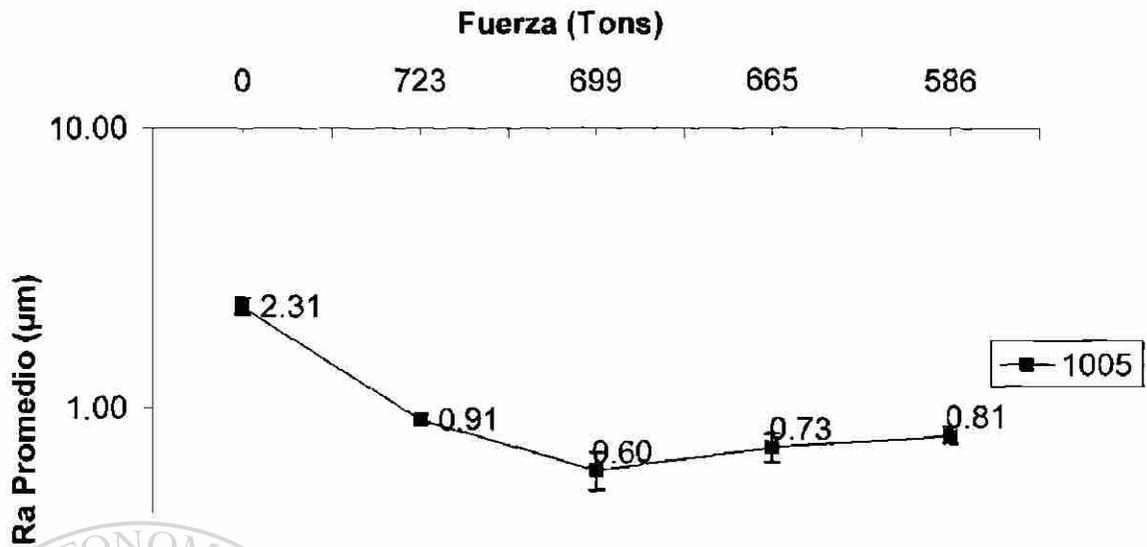


Fig.5.20. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1005.



Fig.5.21. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1008.

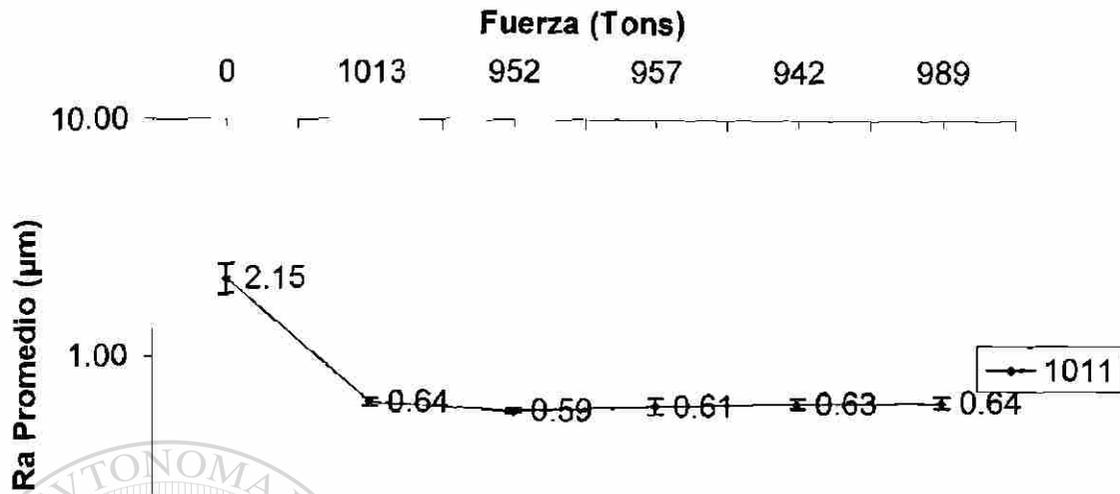


Fig.5.22. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1011.

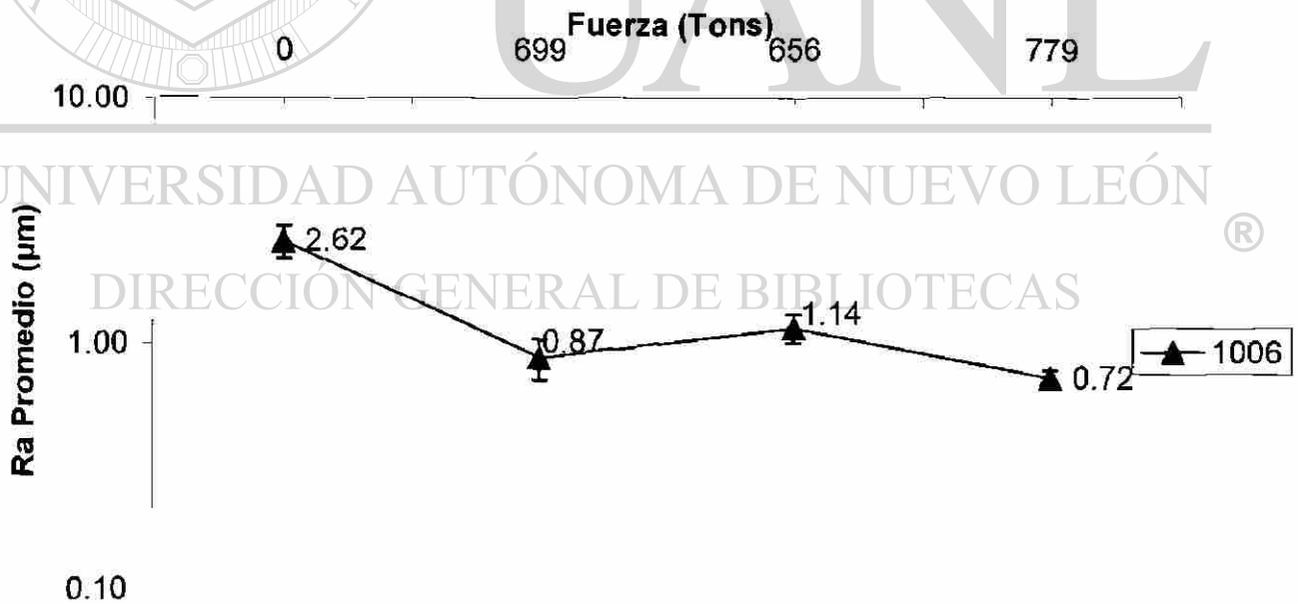


Fig.5.23. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1006.

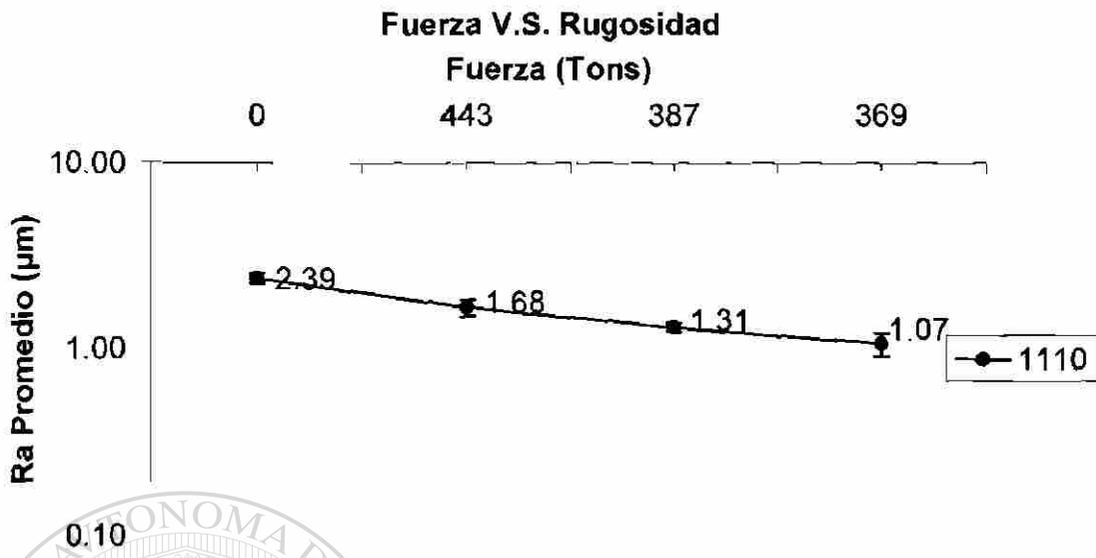


Fig.5.24. Evolución de la rugosidad con respecto a la fuerzas de laminación en el acero 1110.

Como puede apreciarse en estas gráficas, la rugosidad superficial de la cinta de acero prácticamente presenta el mismo comportamiento que se muestra en las graficas elaborados con los valores obtenidos por medio de microscopía de fuerza atómica, en las que, la rugosidad superficial, permanece estable después del primer paso de laminación.

5.6.3 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de laminación

En la grafica que se presenta a continuación se observa el comportamiento de la rugosidad superficial de la cinta de acero conforme se aumenta la velocidad de laminación en m/min

Variación del Ra con respecto a la Velocidad de Laminación

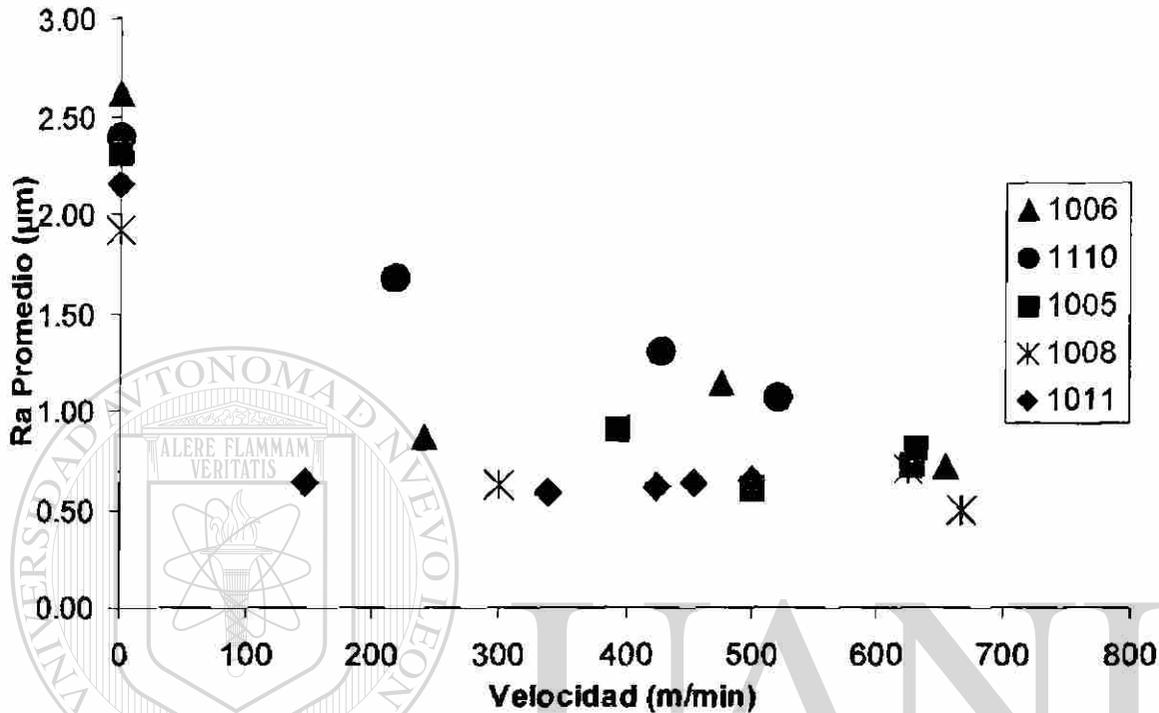


Fig.5.25.Variación del Ra en función de la velocidad de laminación.

Como se había apreciado para el caso de las mediciones realizadas por MFA, la rugosidad de la cinta de acero, permanece constante conforme se incrementa la velocidad.

El efecto de la capa de lubricante formada entre los rodillos de trabajo y la cinta de acero fue también analizado, utilizando los valores de rugosidad obtenidos por perfilometría óptica, la grafica de la Fig. 5.26 muestra que para todos los aceros, la capa de lubricante formada a lo largo de las reducciones, se mantiene.

Evolución del espesor de la capa de lubricante con respecto al % de reducción

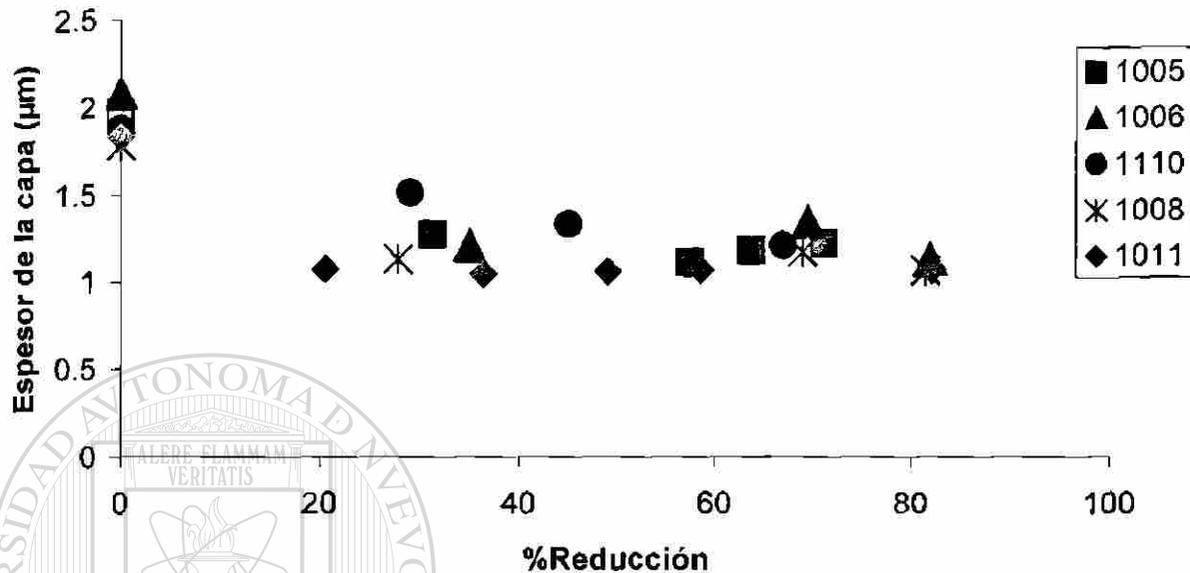


Fig.5.26.Evolución de la capa de lubricante en función del % de reducción.

5.7 Efecto del decapado de acero laminado en caliente, sobre la rugosidad superficial de la cinta de acero

Las imágenes obtenidas por MFA, de las superficies del acero 1006 de experimentos realizados y que se comentaron en la última sección del Capítulo cuatro, se muestran en la Fig. 5.27 en la cual se puede apreciar la evolución de la rugosidad de la superficie con respecto al tiempo de exposición en la solución de HCl y a una temperatura de 85 °C. En la Tabla 5.8.

Tabla.5.8 Resultados de las variables controladas en el experimento.

Tiempo (seg.)	$\Delta\phi$ (mg)	Ra Promedio(μm)	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
0	0	0.013	85
60	0.8	0.075	85
120	1.7	0.105	85
180	5.7	0.222	85

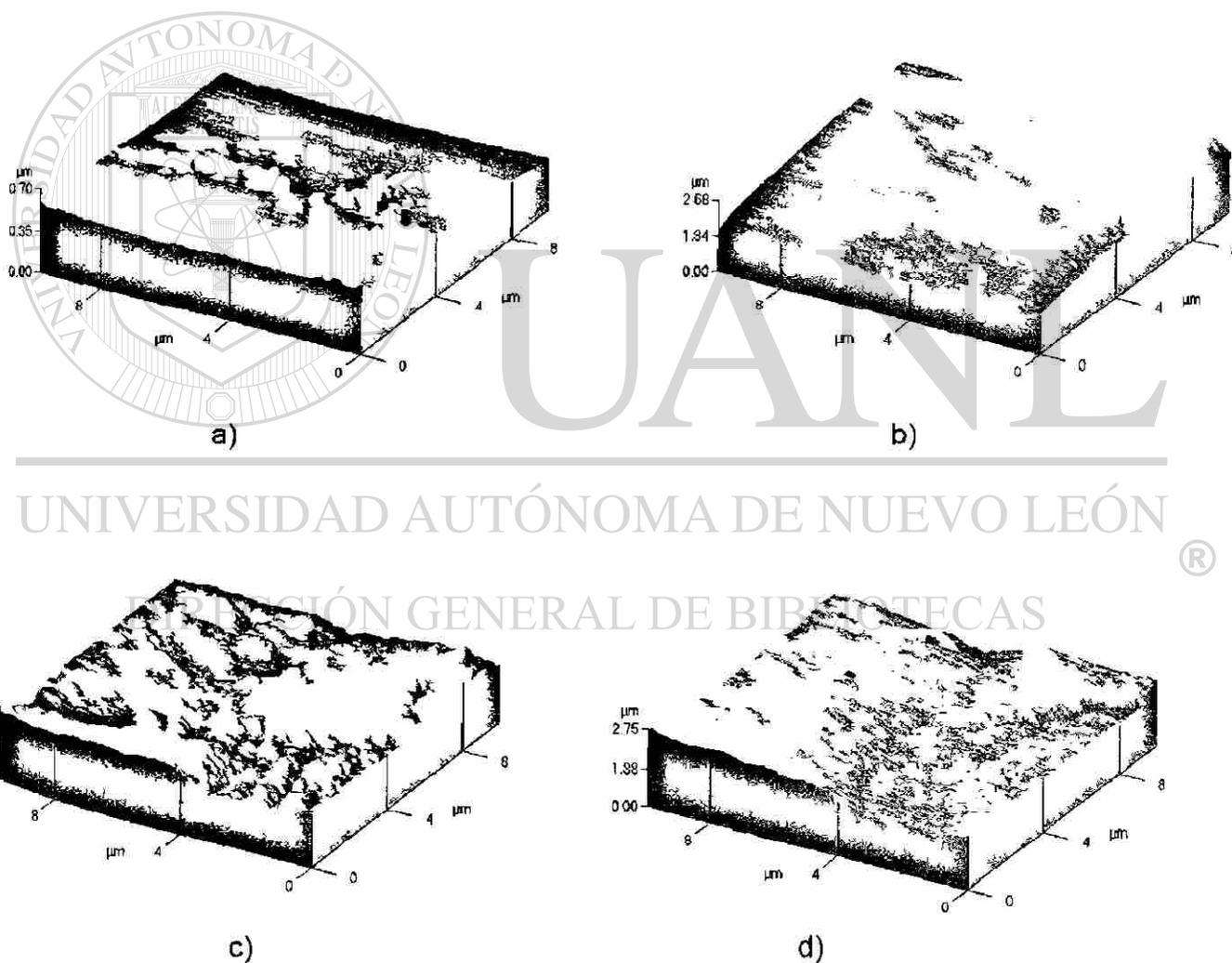
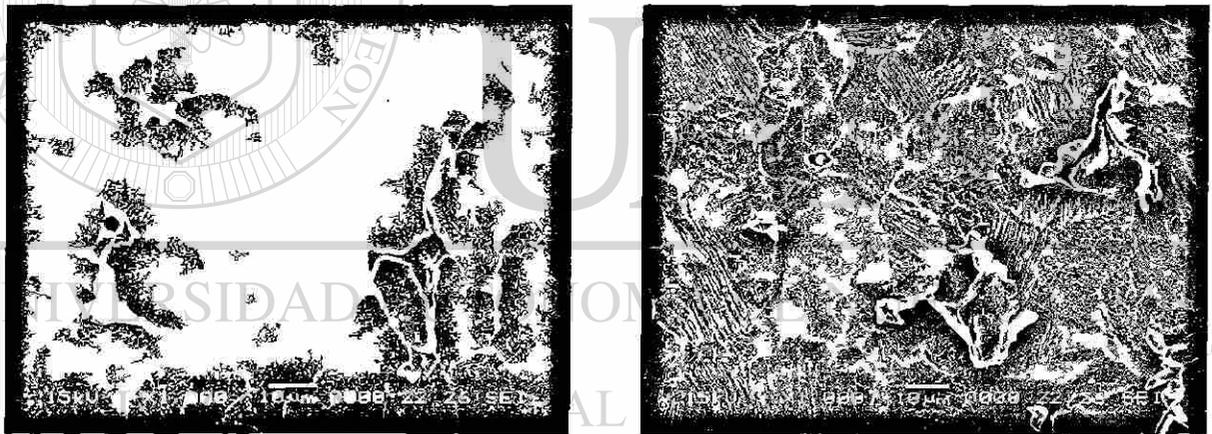


Fig.5.27 Imágenes de MFA mostrando la superficie de las muestras expuestas al medio de ácido clorhídrico a 85 °C, a) 0 segundos, b) 60 segundos, c)120 segundos d) 180 segundos.

Imágenes de microscopía electrónica de barrido (Fig. 5.28), se muestran sólo con el fin de analizar el estado de la muestra y su microestructura y donde se puede apreciar el grado de deterioro en la muestra expuesta durante 180 segundos en la cual aparece una picadura (Fig.5.28 b) en el material en los límites de grano que las cuales pudieran existir como producto de un proceso de decapado severo. Sorprendentemente esta muestra cuenta con una valor de rugosidad Ra promedio de 0.222 μm que es muy cercano al valor que se registró para cuando se realizó la medición inicial del material que provenía del proceso real de decapado, pero que según datos operacionales, sólo estuvo expuesto un tiempo de 18 segundos, además de estar sujeta al proceso de laminación en caliente donde existieron óxidos como resultado del mismo proceso y que fueron removidos mediante el decapado, donde las condiciones de operación son más adecuadas para la remoción de estos óxidos.



a)

b)

Fig.5.28 Imágenes de MEB de electrones secundarios en donde se puede apreciar la microestructura del material (granos ferríticos) y hojuelas de óxido a) 60 segundos de exposición al medio corrosivo, b) 180 segundos de exposición al medio corrosivo, en esta imagen es posible apreciar una picadura en los límites de grano.

La gráfica de la evolución de la rugosidad superficial conforme el material se desprende se muestra en la figura 5.29.

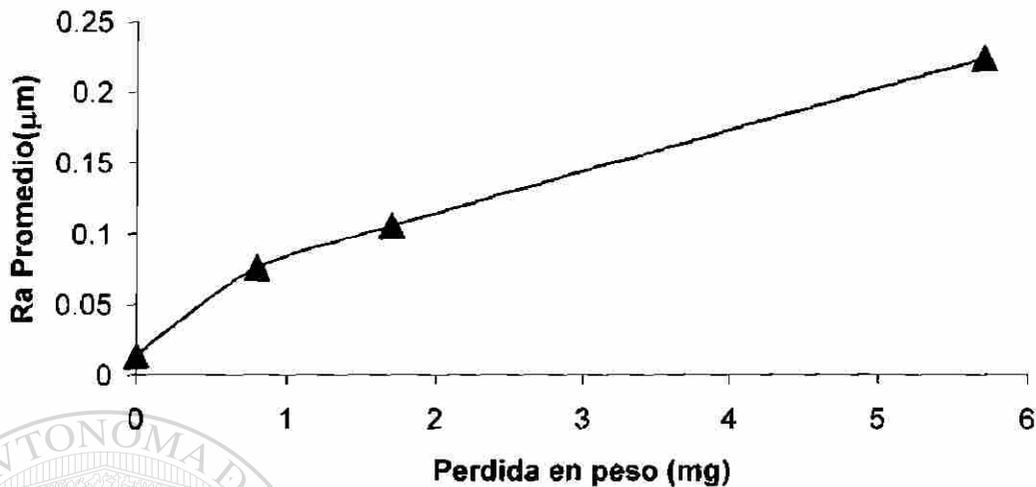


Fig.5.29 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la pérdida en peso.

Conforme el material se va desprendiendo, la superficie tiende a tener una mayor rugosidad, el último valor de rugosidad presentado en la Fig.5.29, como se había mencionado con anterioridad, es muy cercano al valor de la rugosidad inicial del acero 1006 antes de entrar al primer paso de laminación. Si el material no se encuentra protegido por los óxidos superficiales formados debido al proceso de laminación en caliente al momento de ser decapado, el incremento en la rugosidad superficial pudiera afectar el coeficiente de fricción en el intervalo banda-primer paso de laminación, siendo esto reflejado en una calidad deficiente de los productos laminados.

Referencias Bibliográficas

[1] Vander Voort, George.F., "Grain size measurement" Practical applications of quantitative metallography. Mc Call Steele editors. EUA 1982.

[2] Sakai, T., Saito, Y., Kato, K., "Estimation of Lubrication State by Observation of Rolled Strip Surface in High Speed Cold Rolling Of Mild Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

[3] Azushima, A., Kihara, J., Miyagawa, M., "Determination of Lubrication Mechanism by means of Surface Qualification of Cold Rolled Steel", International Conference on Steel Rolling, The Iron and Steel Institute of Japan, September 1980, Tokio Japón.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones

- Los métodos empleados para la caracterización metalográfica de los cinco tipos de aceros analizados, en particular los empleados para determinar el tamaño de grano, arrojan resultados muy similares. El método que emplea el análisis computacional de imágenes determina con mayor exactitud y rapidez el tamaño de grano de las muestras, pero para referencias rápidas cuando no se cuente con equipo de análisis de imágenes, el método Heyn es muy útil y confiable siempre y cuando el material no haya recibido trabajo mecánico.
- El valor de resistencia a la tensión obtenido a través de las pruebas de microdureza Vickers realizadas a los pasos de laminación seleccionados, muestra concordancia con los ensayos de tensión realizados para determinar las propiedades mecánicas para el desarrollo del modelo numérico de laminación en frío, del cual este trabajo es parte, estos son confiables y se obtienen con relativa facilidad por lo tanto pueden ser una opción más para el aporte de datos con fines de modelación numérica.
- La relación entre el tamaño de grano y la rugosidad superficial en el material proveniente del proceso de decapado no parece tener una relación directa, pero tiene la tendencia a corresponder con estudios previos realizados en donde se menciona que en aceros de tamaño de grano grueso se tiende a incrementar la rugosidad superficial y aceros de tamaños de grano fino favorecen superficies no tan rugosas, lo que pudiera estar más relacionado con las condiciones de laminación en caliente.
- Se observó que el comportamiento que sigue la rugosidad superficial de los aceros durante el proceso de laminación en frío es prácticamente el

mismo cuando este valor se relaciona con respecto a las variables de operación del proceso tales como disminución en espesor, fuerza, velocidad, etc. Es decir la tendencia es de bajar en el intervalo de banda a primer paso de laminación y en las etapas siguientes del proceso el valor de rugosidad superficial se mantiene prácticamente constante, esto indica que no existe contacto metal-metal entre los rodillos de laminación y cinta de acero durante el proceso y que las condiciones de lubricación durante todas las etapas del mismo se cumplieron satisfactoriamente. Esto marca la pauta para considerar que con respecto a los aspectos superficiales de la cinta de acero, el coeficiente de fricción para fines de modelación matemática y numérica puede considerarse constante y que las variaciones en el valor del mismo sólo se deberán a las propiedades de los lubricantes empleados. Así mismo, el desarrollo de modelos de laminación considerando a los rodillos como sólidos rígidos y a la cinta de acero como sólido deformable es favorable debido a que no existe contacto entre ellos debido a las condiciones de lubricación satisfactorias.

- El contenido de silicio en los aceros de muestra no parece tener un efecto en la rugosidad superficial de la lámina de acero al ser procesada, esto es cuando las mediciones son realizadas por medio de perfilometría óptica, en cambio, cuando las muestras son analizadas por medio de microscopía de fuerza atómica, se tiene una tendencia, en la que se observó que el contenido de silicio tiene relación con la rugosidad de la superficie.
- Se observó que existe una relación entre la pérdida en peso de la cinta de acero y a la rugosidad superficial, pero este efecto fue estudiado para condiciones de tiempo de exposición al medio corrosivo mayores que las del proceso real, con estas pruebas puede ser posible predecir el valor de la rugosidad de la lámina al término del proceso de decapado.
- En este estudio se utilizaron dos técnicas para caracterizar la evolución de la rugosidad de aceros laminados en frío. La técnica de MFA se concluye que no puede ser utilizada para determinar un valor preciso de

rugosidad, debido a que la escala de análisis, es muy pequeña, sin embargo, puede ser de mucha ayuda para relacionar aspectos superficiales en escala micrométrica tales como tamaño de grano, relación de rugosidad con elementos de aleación. Con la técnica de perfilometría óptica, se tiene una resolución en escala milimétrica, en la cual es posible relacionar la rugosidad de la superficie con los parámetros de rugosidad de rodillos, lubricantes, etc. Es decir la técnica de perfilometría óptica, es la más adecuada para caracterizar los aceros que sean laminados en frío y se establece que, la tendencia de la rugosidad superficial de los aceros al ser laminados en frío se mantiene conforme se desarrolla el proceso y es independiente de los valores de fuerza y velocidad de laminación.

6.2 Recomendaciones

- Analizar el comportamiento de la rugosidad superficial para más aceros laminados en frío incluyendo aceros inoxidables ya, que estos últimos sirven como base para el desarrollo de nuevas técnicas de lubricación en la laminación en frío.
- Estudiar más a fondo el efecto del proceso de decapado de cinta de acero, variando composiciones químicas y porcentaje de fases para tratar de determinar que efectos puede tener este proceso sobre los valores de rugosidad superficial y, por lo tanto, cual sería su impacto al momento de la laminación en frío.
- Estudiar el comportamiento y las propiedades de los lubricantes empleados en la laminación en frío con la finalidad de determinar la influencia que tienen en conjunto con los aspectos superficiales sobre el valor del coeficiente de fricción en el proceso.
- Sería conveniente hacer estudios para tratar de observar el comportamiento caótico de las superficies de acero mediante el uso de geometría de fractales.

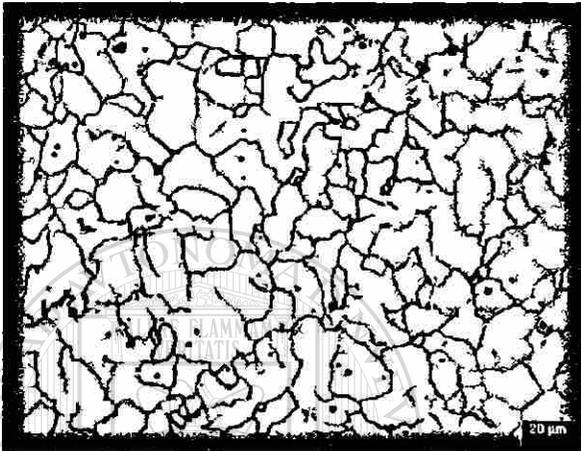
ANEXO 1

EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA.

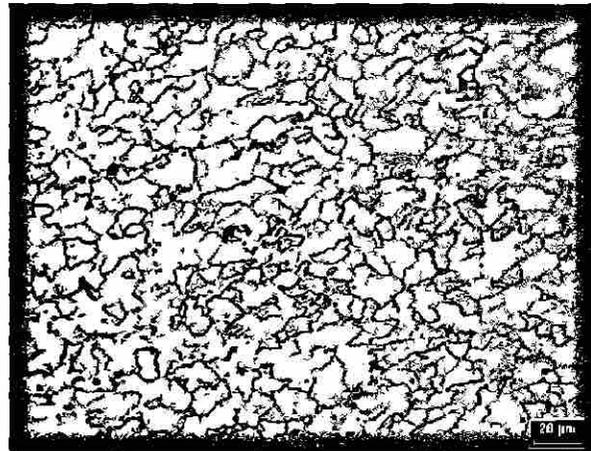
%Reducción Local = valor de la reducción con respecto a su pase anterior.

%Reducción Acumulado = valor de la reducción con respecto a la banda.

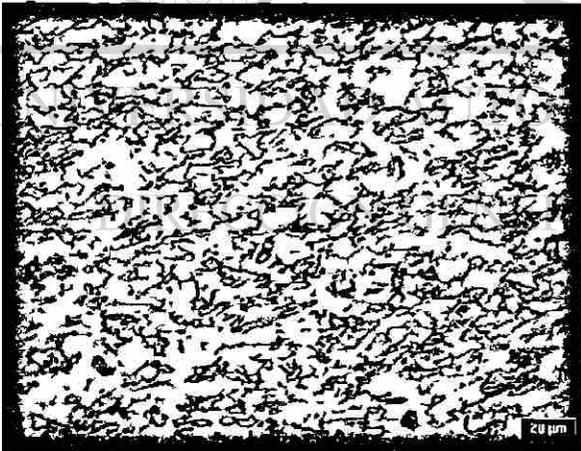
Acero 1005



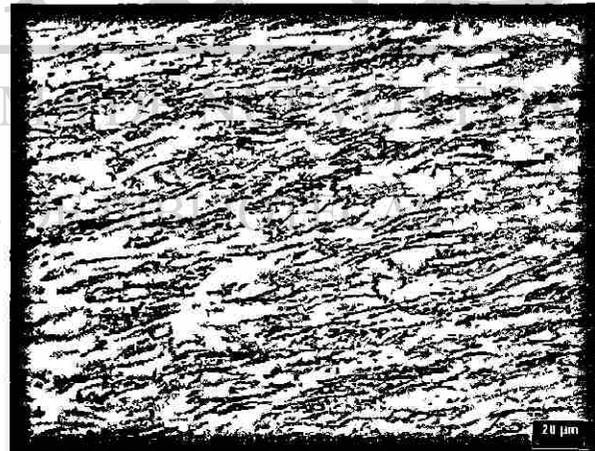
Banda
%Reducción local =0
%Reducción Acumulado =0
20X, Nital 3%



Paso 1
%Reducción local =31.25
%Reducción Acumulado =31.25
20X, Nital 3%



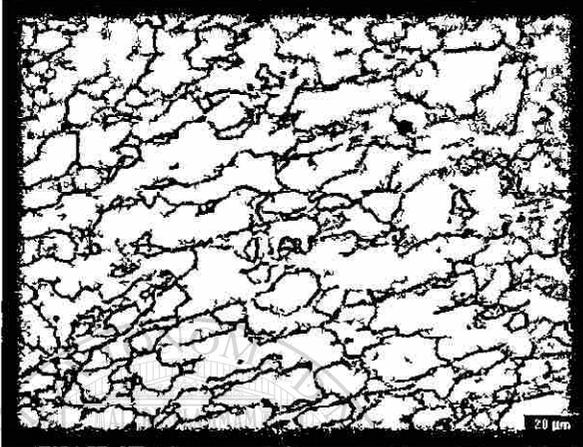
Paso 2
%Reducción local =38.18
%Reducción Acumulado =57.50
20X, Nital 3%



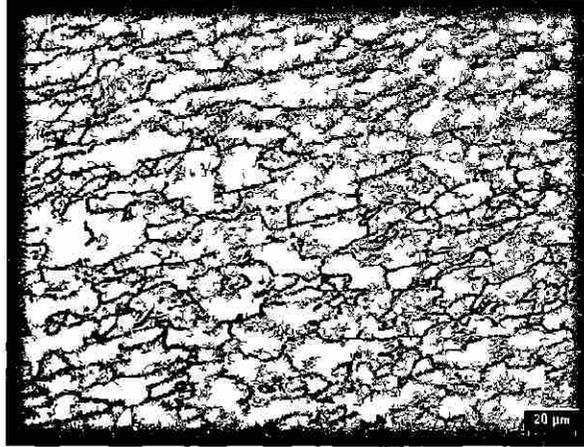
Paso 4
%Reducción local =20.64
%Reducción Acumulado =71.25
20X, Nital 3%

ANEXO 1
EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA.

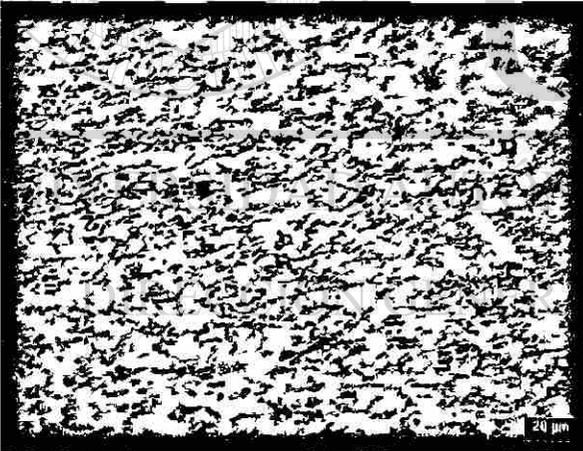
Acero 1008.



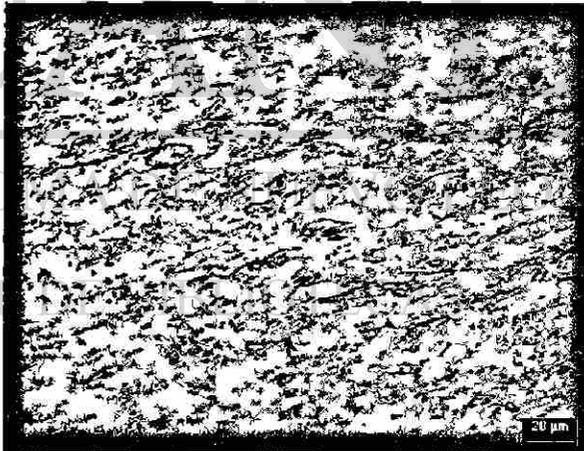
Banda
%Reducción local =0
%Reducción Acumulado =0
20X, Nital 3%



Paso 1
%Reducción local =27.78
%Reducción Acumulado =27.78
20X, Nital 3%



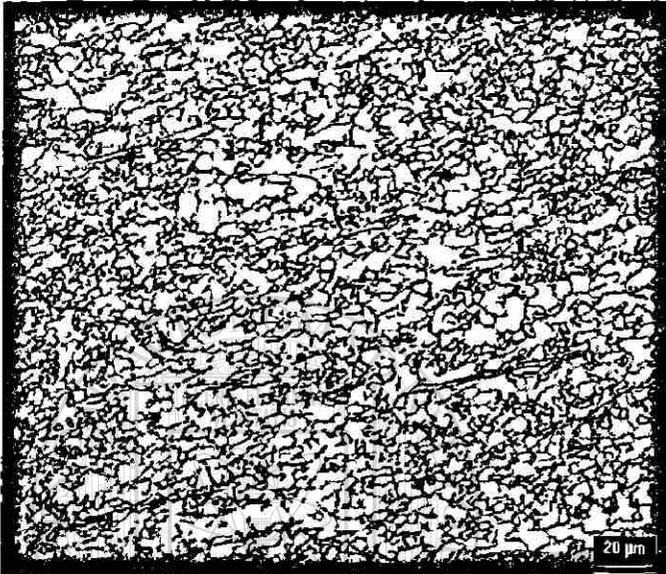
Paso 2
%Reducción local =24.92
%Reducción Acumulado=45.78
20X, Nital 3%



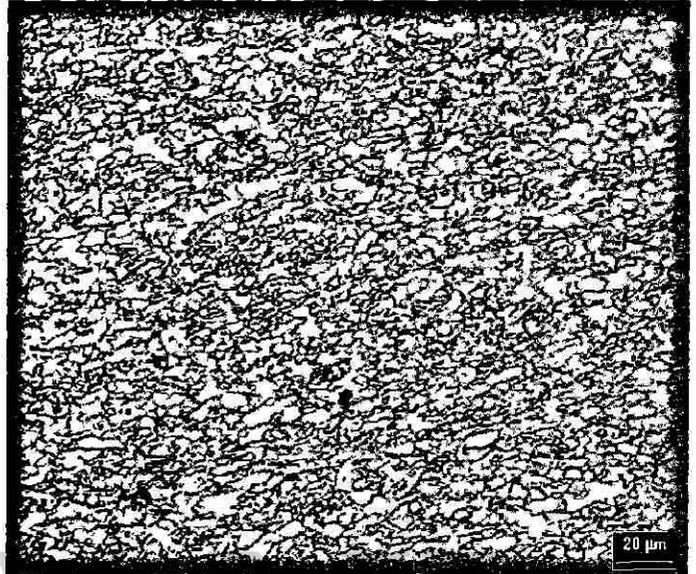
Paso 4
%Reducción local =23.98
%Reducción Acumulado =69.0
20X, Nital 3%

ANEXO 1
EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS
DE PRUEBA.

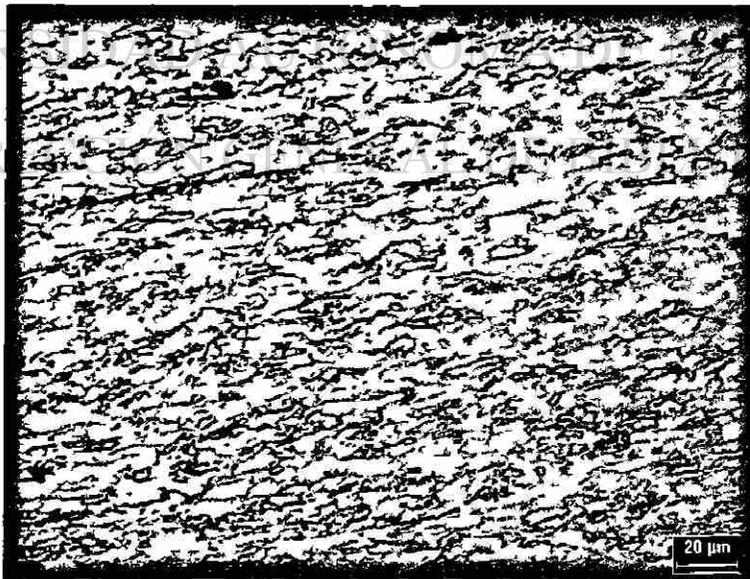
Acero 1011.



Banda
%Reducción local =0
%Reducción Acumulado =0
20X, Nital 3%



Paso 1
%Reducción local =20.5
%Reducción Acumulado =20.5
20X, Nital 3%



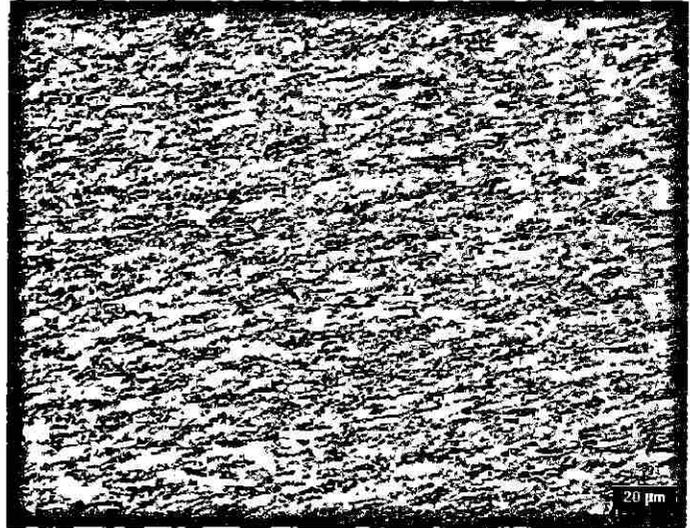
Paso 2
%Reducción local =20.0
%Reducción Acumulado =36.4
20X, Nital 3%

ANEXO 1
EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS
DE PRUEBA.

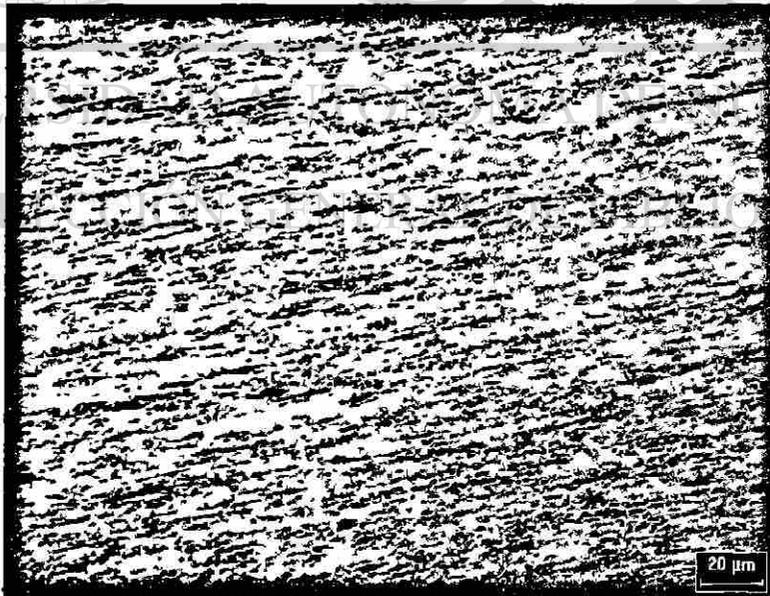
Acero 1011.



Paso 3
%Reducción local =19.81
%Reducción Acumulado =49.0
20X, Nital 3%



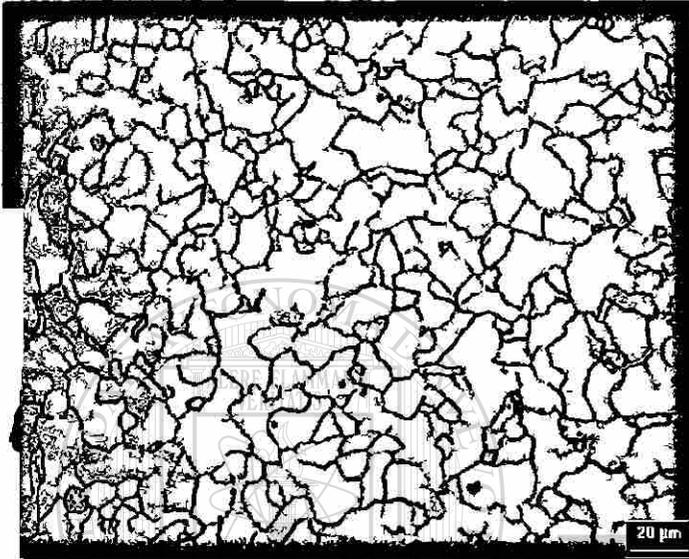
Paso 4
%Reducción local =18.63
%Reducción Acumulado =58.5
20X, Nital 3%



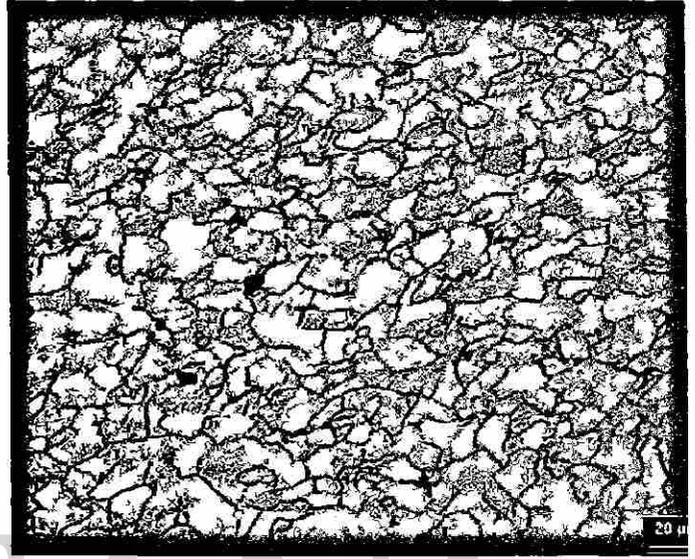
Paso 8
%Reducción local =18.86
%Reducción Acumulado =78.1
20X, Nital 3%

ANEXO 1
EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS
DE PRUEBA.

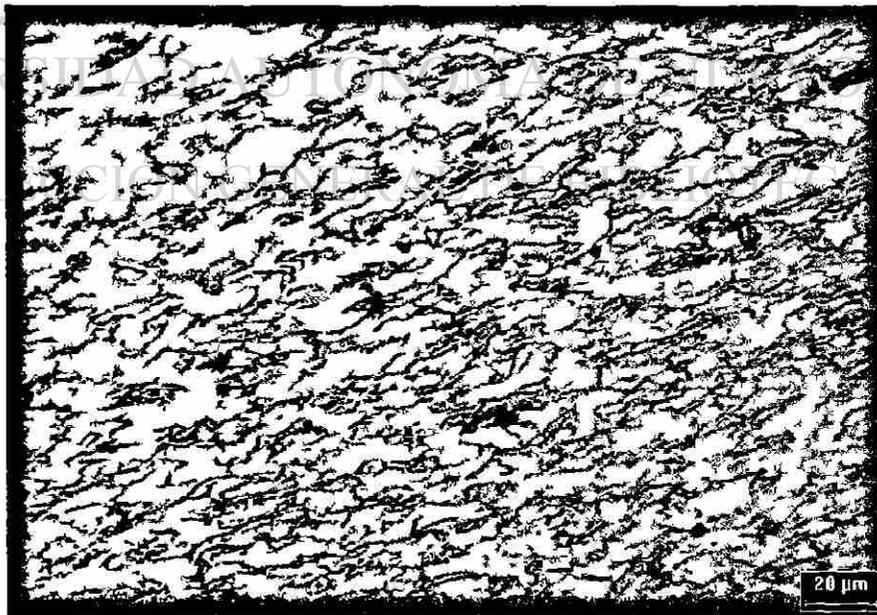
Acero 1006.



Banda
%Reducción local =0
%Reducción Acumulado =0
20X, Nital 3%



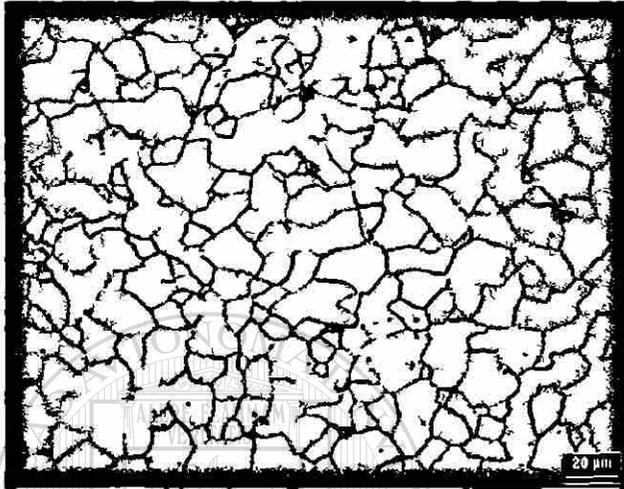
Paso 1
%Reducción local =35.00
%Reducción Acumulado =35.00
20X, Nital 3%



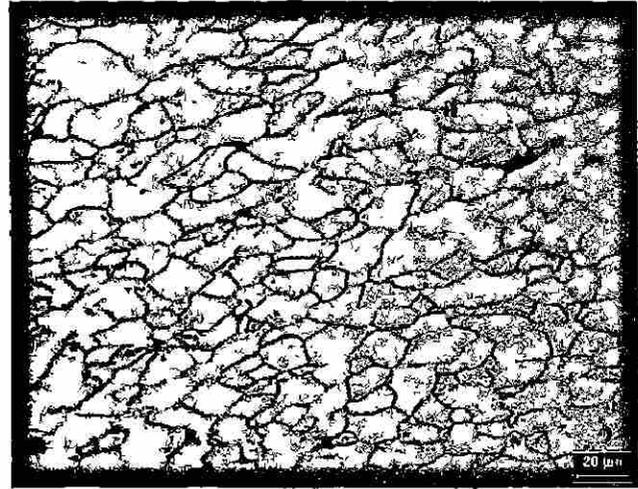
Paso 4
%Reducción local =29.92
%Reducción Acumulado =78.62
20X, Nital 3%

ANEXO 1
EVOLUCION MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA.

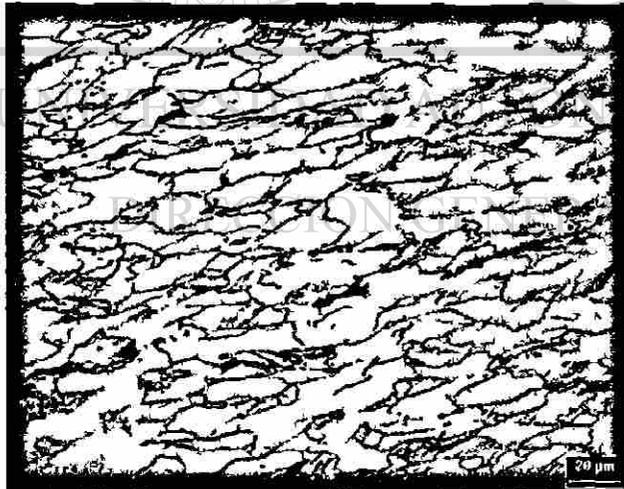
Acero 1110.



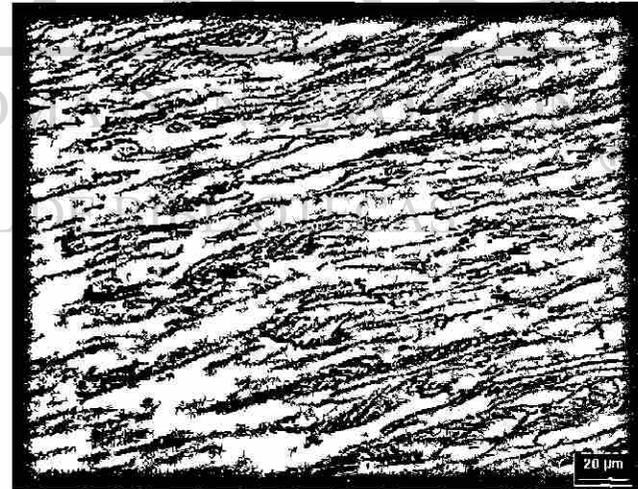
Banda
%Reducción local =0
%Reducción Acumulado =0
20X, Nital 3%



Paso 1
%Reducción local =29.0
%Reducción Acumulado =29.0
20X, Nital 3%



Pase 2
%Reducción local =22.54
%Reducción Acumulado =45.0
20X, Nital 3%

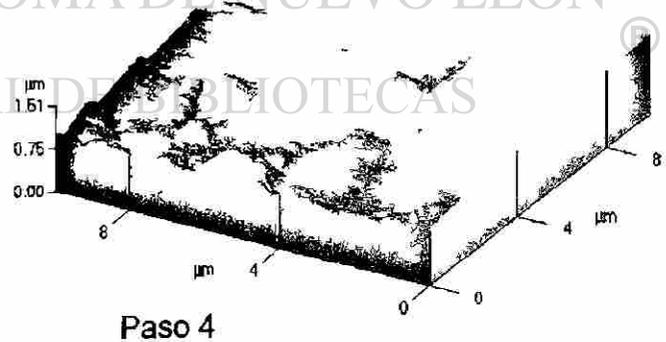
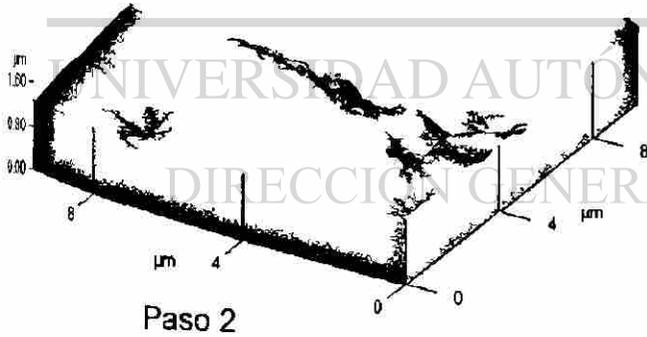
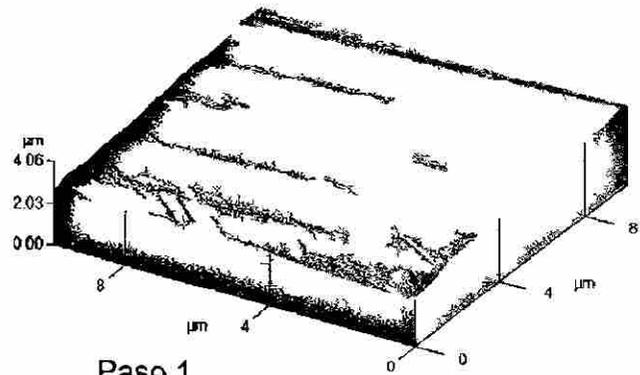
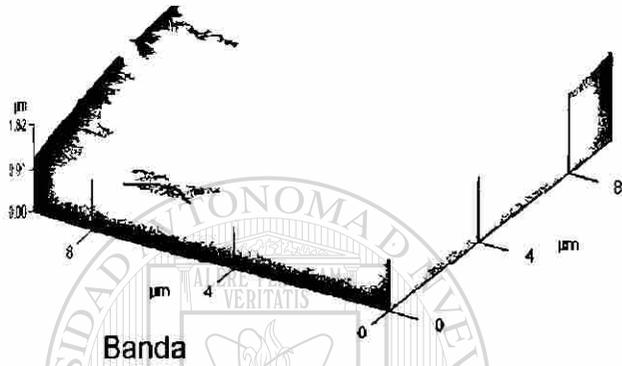


Paso 4
%Reducción local =22.35
%Reducción Acumulado =67.0
20X, Nital 3%

ANEXO 2
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR MFA.

Acero 1005

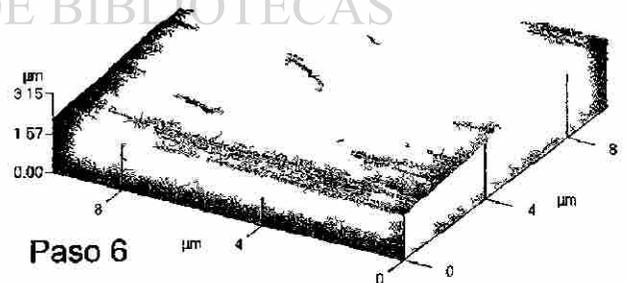
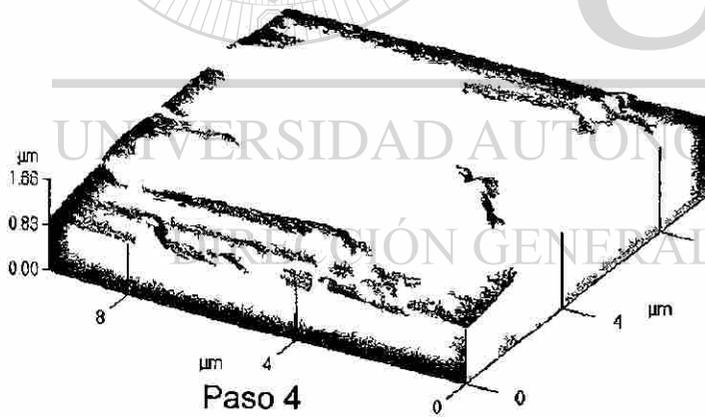
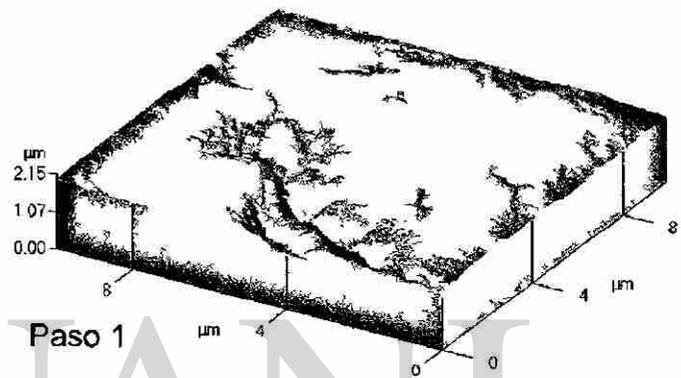
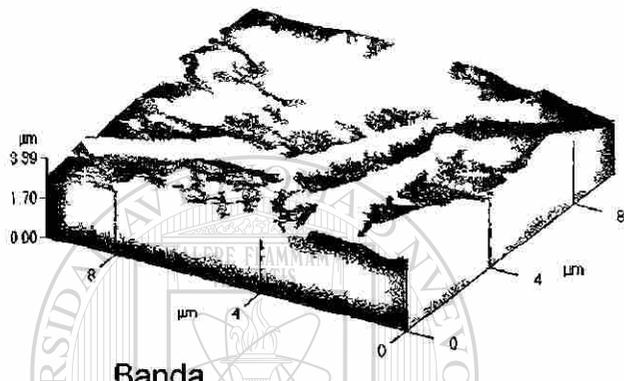
Dirección de laminación.



ANEXO 2
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR MFA.

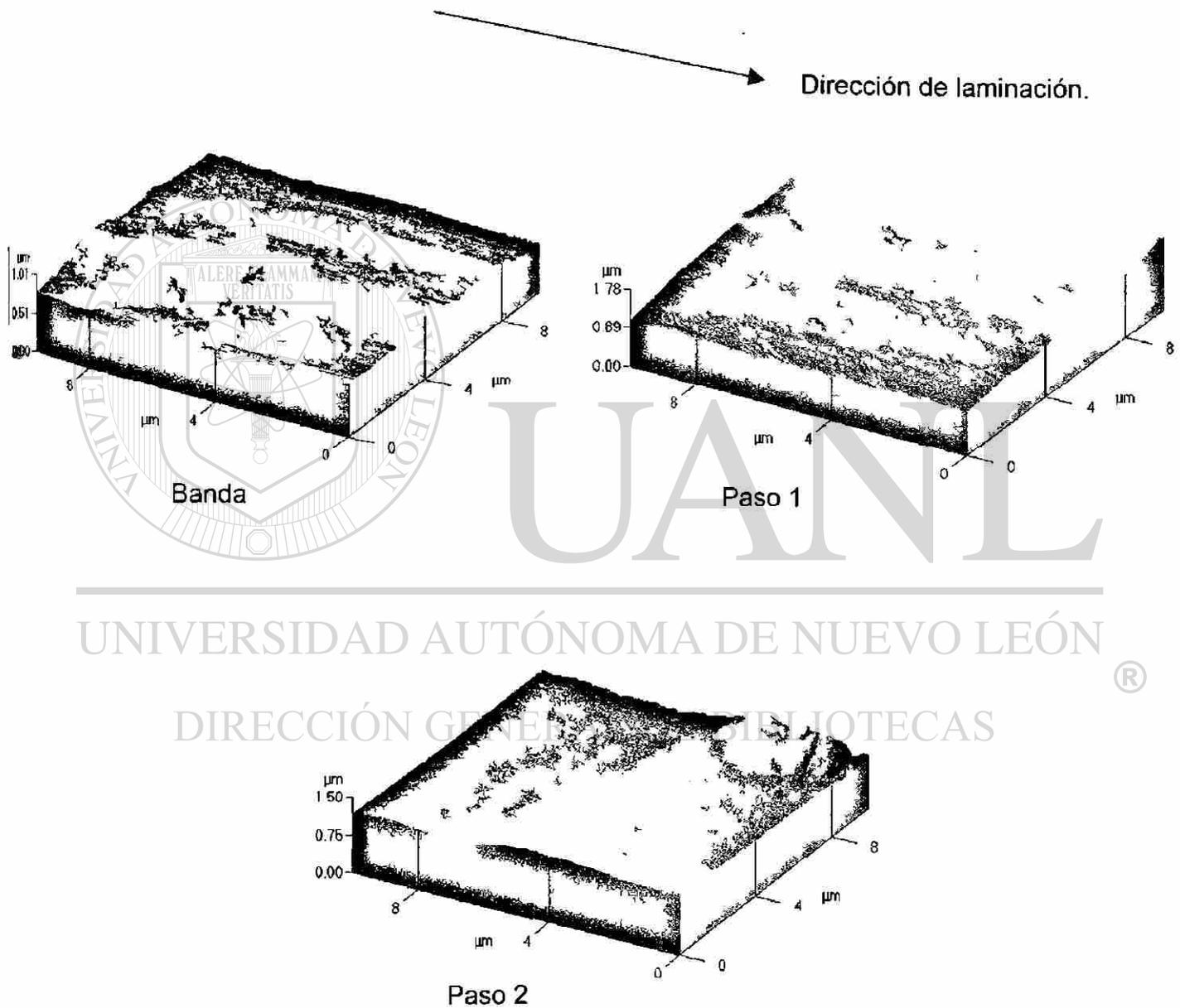
Acero 1008

→ Dirección de laminación.



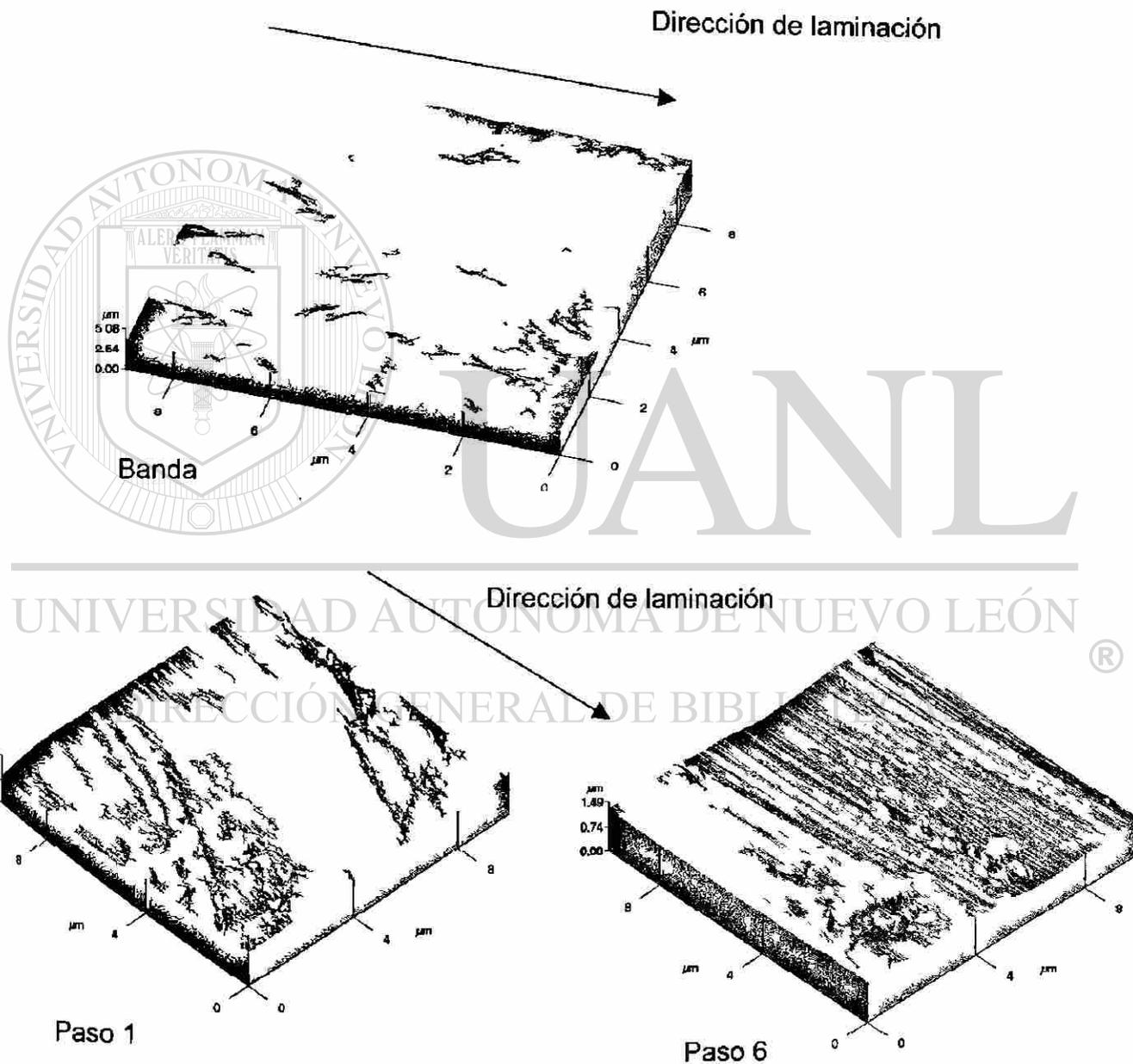
ANEXO 2
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR MFA.

Acero 1011



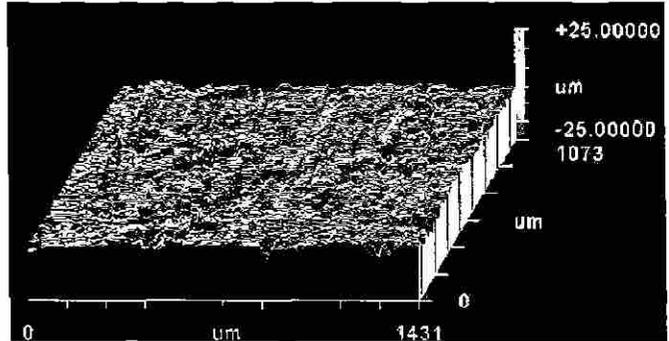
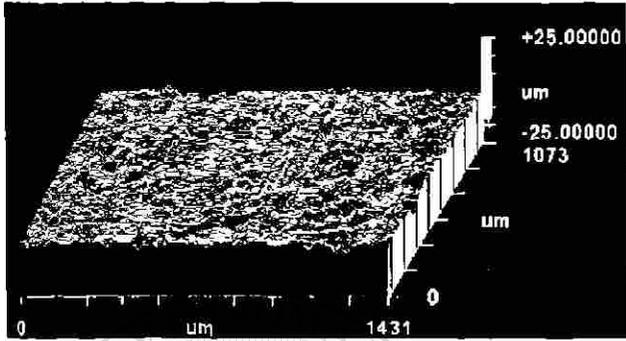
ANEXO 2 IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS POR MFA.

Acero 1006



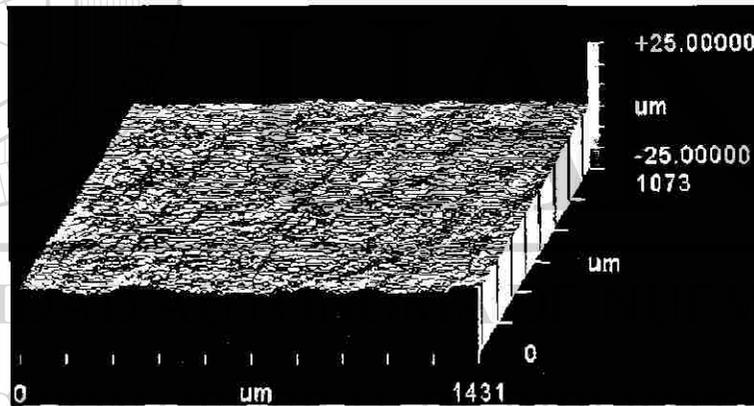
ANEXO 3
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR PERFILOMETRÍA ÓPTICA.

Acero 1005

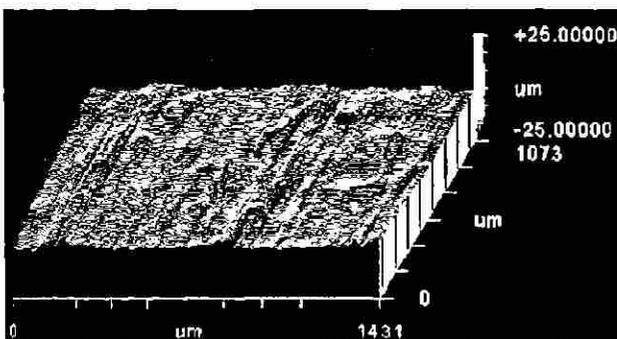


Banda

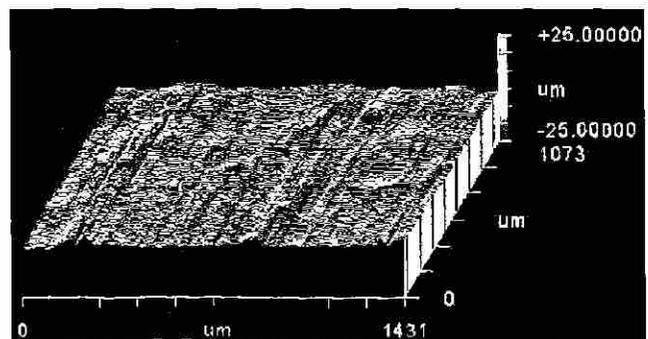
Paso 1



Paso 2



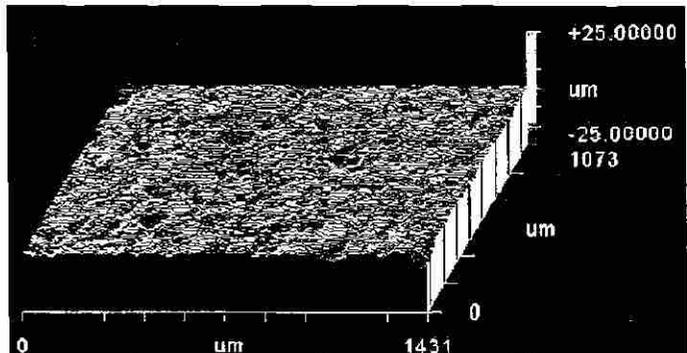
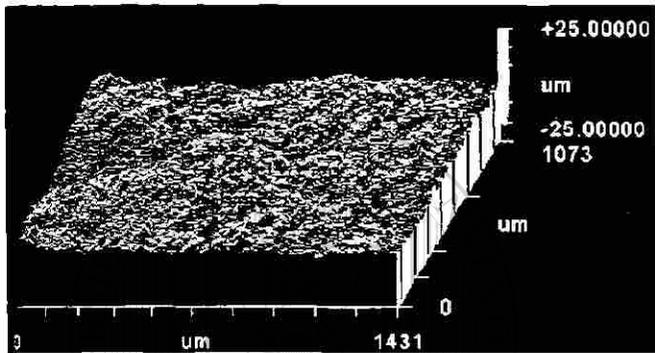
Paso 3



Paso 4

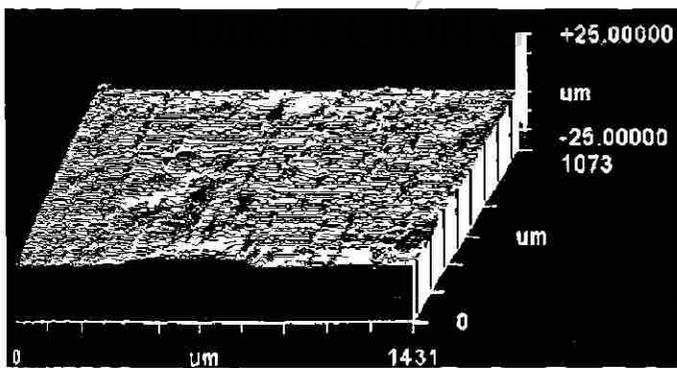
ANEXO 3
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR PERFILOMETRÍA ÓPTICA.

Acero 1008

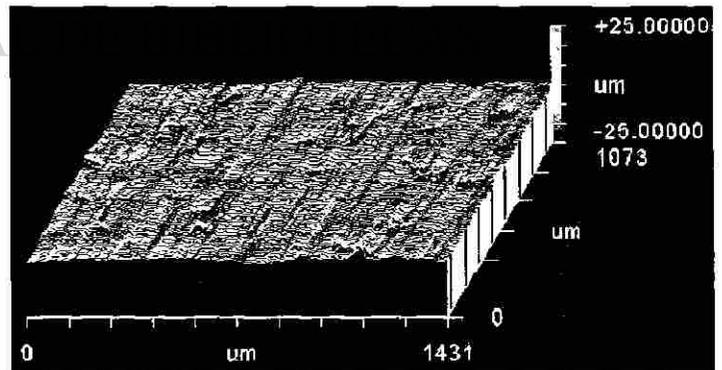


U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



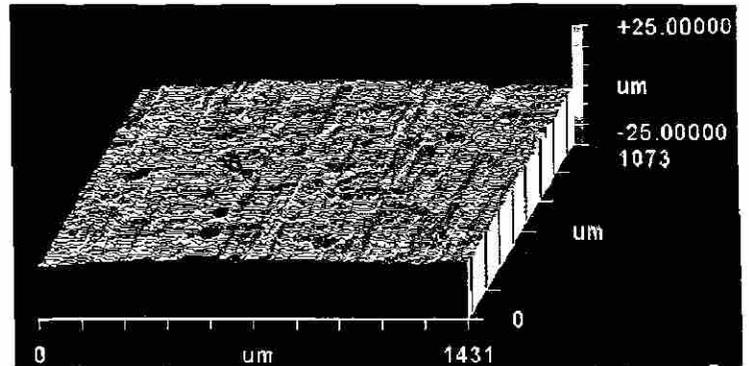
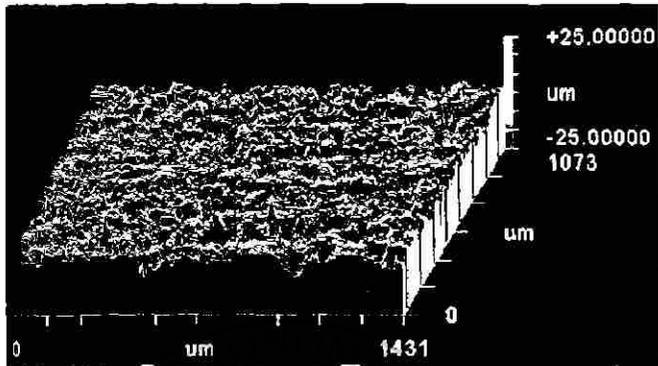
Paso 4



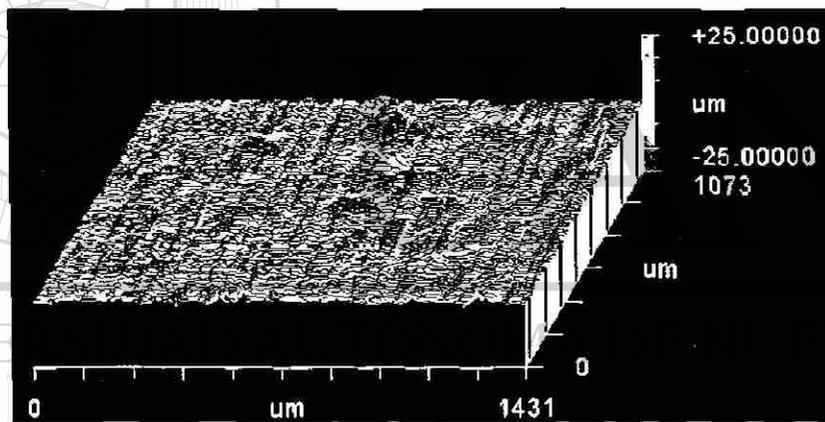
Paso 6

ANEXO 3
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR PERFILOMETRÍA ÓPTICA.

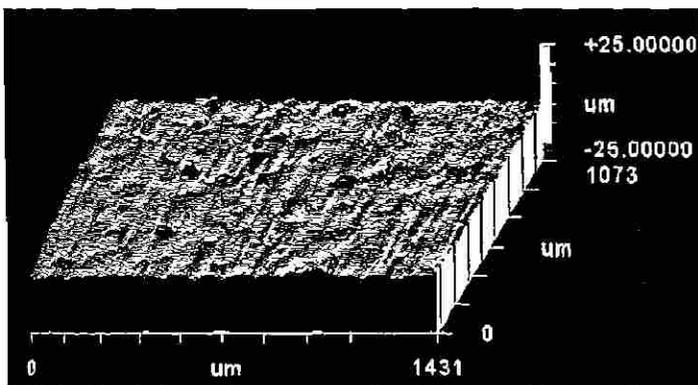
Acero 1011



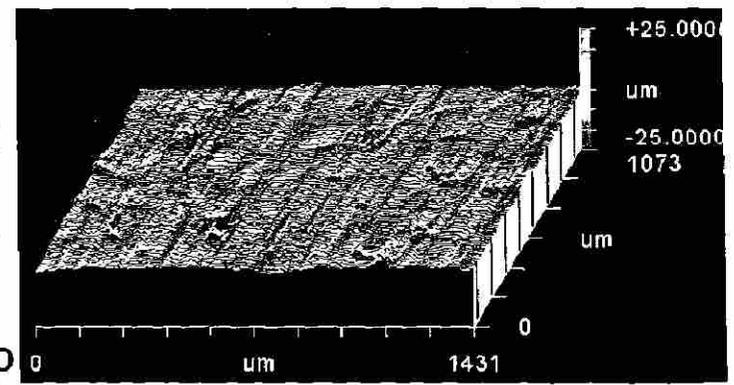
Paso 1



Paso 2



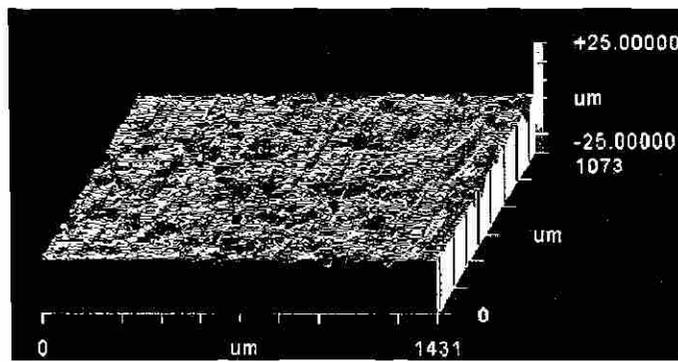
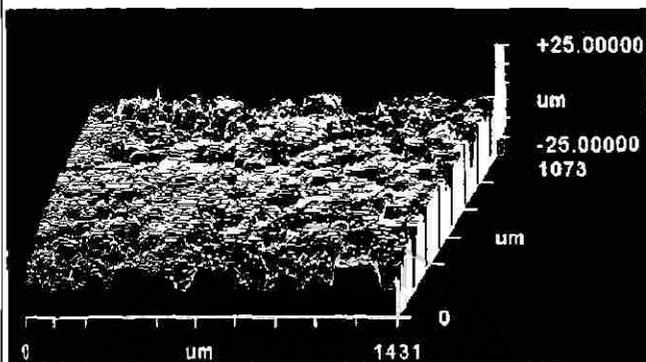
Paso 4



Paso 8

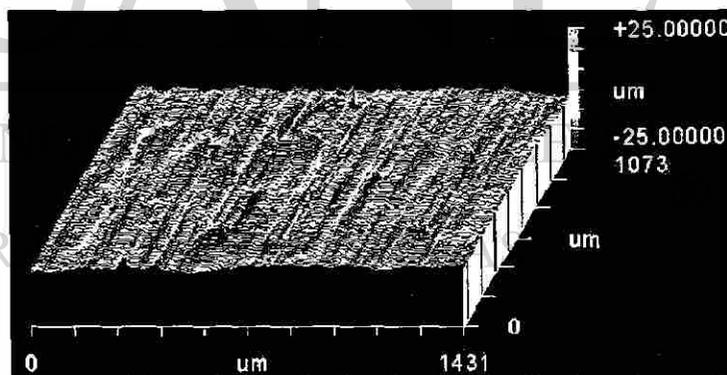
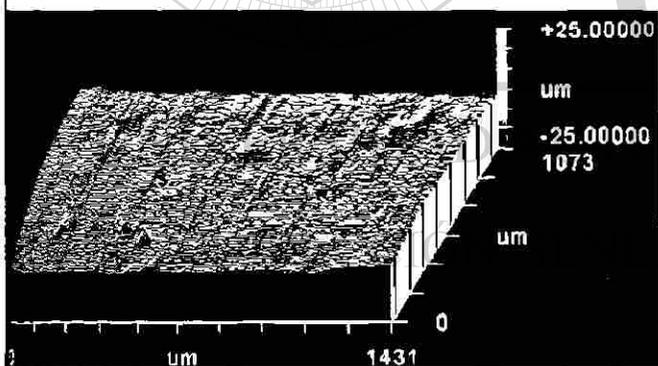
ANEXO 3
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR PERFILOMETRÍA ÓPTICA.

ACERO 1006



Banda

Paso 1

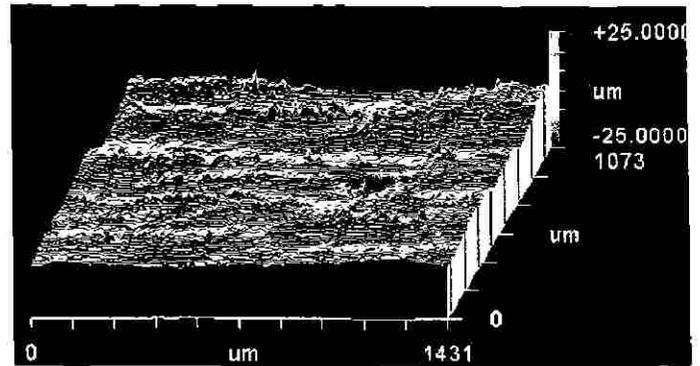
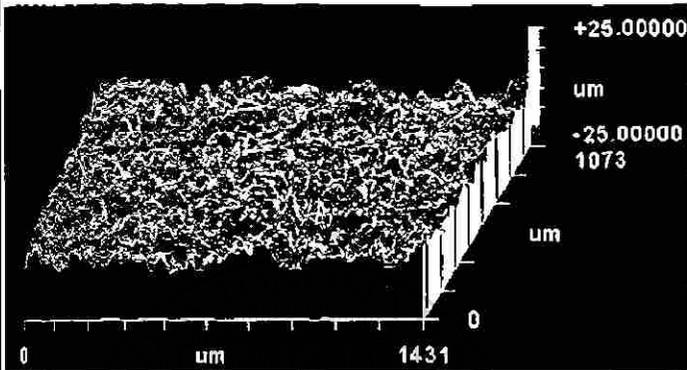


Paso 3

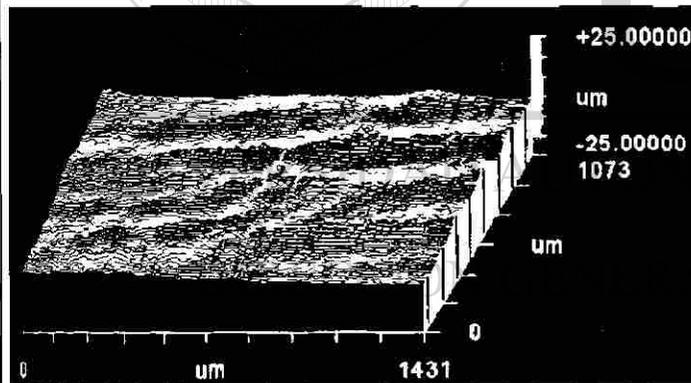
Paso 6

ANEXO 3
IMÁGENES TOPOGRÁFICAS DE LOS ACEROS DE PRUEBA OBTENIDAS
POR PERFILOMETRÍA ÓPTICA.

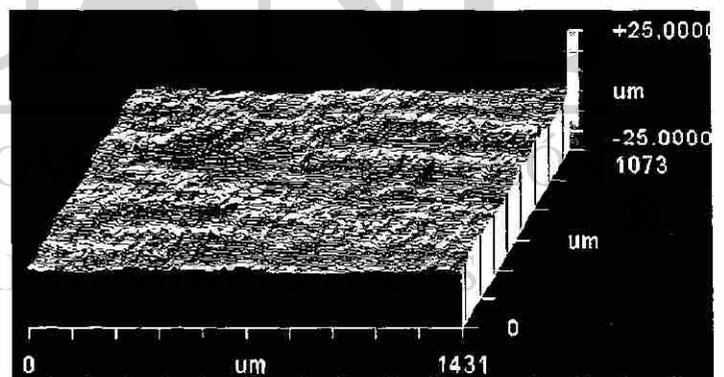
Acero 1110



Paso 1



Paso 3



Paso 6

LISTADO DE TABLAS

TABLA	PAG
4.1 Aceros muestreados y su composición química.	44
4.2 Características de operación de los molinos	46
4.3 Selección de las muestras a analizar.	48
4.4 Composición química real de los aceros.	48
5.1 Composición química de los aceros	60
5.2 Resultados de las fases presentes en los aceros.	61
5.3 Tamaño de grano promedio de los aceros.	64
5.4 Datos de los ensayos de microdureza.	67
5.5 Valores Ra promedio obtenidos por MFA.	69
5.6 Análisis de la rugosidad de la superficie de los rodillos.	77
5.7 Valores Ra promedio obtenidos por perfilometría óptica.	79
5.8 Resultados de las variables controladas.	89

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE FIGURAS.

FIGURA	PAG
2.1 Diagrama de Leonardo da Vinci: Máquina para laminar plomo.	4
2.2 Diagrama de un molino laminador.	4
2.3 Molino construido por Salomón de Caus para laminar plomo.	5
2.4 El proceso de laminación.	7
2.5 El proceso de forja.	7
2.6 Esfuerzos en un elemento infinitesimal de volumen, de una pieza en compresión plana.	8
2.7 Condición de plasticidad para el elemento en compresión plana.	9
2.8 Colina de fricción.	10
2.9 Arreglos típicos de molinos de laminación.	11
2.10 Fuerzas durante la laminación.	12
2.11 Representación de las fuerzas durante el proceso de laminación.	14
2.12 Proceso de laminación en caliente de acero.	16
2.13 Esfuerzos actuando en un elemento diferencial durante la laminación.	18
<hr/>	
2.14 Temperaturas críticas durante en la lubricación de frontera.	21
2.15 Lubricación hidrodinámica.	21
2.16 Lubricación de película sólida.	22
3.1 Representación esquemática de la superficie de un metal.	26
3.2 Asperezas de una superficie supuestamente lisa.	27
3.3 Rugosidad de una superficie.	28
3.4 Ondulación de una superficie.	28
3.5 Error de forma de una superficie.	29
3.6 Representación topográfica de la superficie de una articulación humana artrítica.	29
3.7 Perfilómetro de aguja	30
3.8 Perfil de una superficie analizada mediante perfilómetro de aguja.	30

3.9 Diagrama esquemático de un interferómetro óptico.	31
3.10 Separación entre átomos que corresponde al estado de equilibrio.	32
3.11 Principio de funcionamiento del MFA.	33
3.12 Precipitados de una aleación de aluminio identificados por MFA.	34
3.13 Imágenes topográficas obtenidas por MFA.	34
3.14 Perfil de alturas de una superficie.	35
3.15 Rugosidad superficial en función de la velocidad de laminación.	39
3.16 Efecto de la velocidad de laminación sobre la cinta.	40
3.17 Comportamientos estudiados por Sakai, Saito y Sato.	41
4.1 Molinos de laminación.	44
4.2 Distribución física de las muestras.	46
4.3 Muestras preparadas para análisis metalográfico.	49
4.4 Microscopio óptico.	50
4.5 Imágenes fotográficas utilizadas para el conteo de granos (método Heyn).	51
4.6 Medición realizada en un grano.	51
4.7 Microdurómetro marca Shimadzu.	52
4.8 Identación realizada en los ensayos de microdureza.	53
4.9 Microscopio de fuerza atómica marca Parker Scientific Instruments.	54
4.10 Perfil de alturas de una imagen obtenida mediante MFA.	55
4.11 Perfilómetro marca Zygo.	56
4.12 Imagen bidimensional obtenida por perfilometría óptica .	57
4.13 Perfil típico de alturas.	57
5.1 Micrografía acero AISI/SAE 1008.	61
5.2 Micrografía acero AISI/SAE 1006.	62
5.3 Micrografía acero AISI/SAE 1011.	62
5.4 Evolución microestructural del acero 1005.	63
5.5 Tamaño de grano promedio de los aceros.	64
5.6 Resultados de los ensayos de microdureza realizados en función de la resistencia a la tensión.	67
5.7 Evolución superficial del acero 1008 analizada por MFA.	69

5.8	Rugosidad de la banda con respecto al tamaño de grano y al contenido de silicio de los aceros.	71
5.9	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la disminución en espesor .	71
5.10	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1005.	72
5.11	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en los aceros AISI/SAE 1008 y 1011.	73
5.12	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en los aceros AISI/SAE 1006 y 1110.	74
5.13	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a velocidad de laminación en los aceros.	75
5.14	Comportamiento de la capa de lubricante con respecto al % de reducción de los aceros.	77
5.15	Comportamiento de la capa rugosidad superficial con en función de la capa de lubricante en el proceso.	78
5.16	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la disminución en espesor.	80
<hr/>		
5.17	Rugosidad de la banda con respecto al tamaño de grano.	81
5.18	Rugosidad de la banda con respecto al contenido de Si.	82
5.19	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a la disminución en espesor .	83
5.20	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1005.	84
5.21	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1008	84
5.22	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1011.	85
5.23	Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1006.	85

5.24 Evolución de la rugosidad superficial con respecto a las fuerzas de laminación en el acero AISI/SAE 1110.	86
5.25 Variación de Ra en función de la velocidad de laminación.	87
5.26 Comportamiento de la capa de lubricante con respecto al % de reducción de los aceros.	88
5.27 Evaluación del proceso de decapado.	89
5.28 Imágenes de microscopía electrónica de barrido mostrando ataque severo de las muestras expuestas al medio ácido.	90
5.29 Evolución de la rugosidad superficial en función de la pérdida en peso.	91



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Nelson Federico Garza Montes de Oca

Candidato para el Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

Tema: Caracterización microestructural y superficial de aceros laminados en caliente y en frío.

Nelson Federico Garza Montes de Oca nació en Monterrey Nuevo León, México, el 21 de mayo de 1979, es hijo del señor Federico Garza Arellano y la señora Maricela Montes de Oca Rodríguez. En Agosto de 1996 inició sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica y en Julio del 2001 recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el Título Honorífico. En Febrero del 2002, inicia sus estudios de Postgrado, con beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), en la misma Facultad. Participó en el Programa "Acero 2000" organizado por la Sociedad del Hierro y del Acero, en Junio del 2000. Fue ganador del Testimonio de Alto Rendimiento Académico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica otorgado por el Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior (CENEVAL), en Mayo del 2002. Participó con el programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología en la Red Temática Iberoamericana de Aceros Tradicionales y Aceros Estructurales Avanzados, en Mayo del 2003.

